

EFECTOS DE INTERACCION DE BUSES Y AUTOS EN TRAFICO URBANO

Jaime Gibson

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago, Chile

Rodrigo Fernández

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción
Casilla 53-C, Concepción, Chile

RESUMEN

Una de las características predominantes del tráfico urbano en los países del Tercer Mundo es la coexistencia en las vías principales de autos y buses en proporciones ambas significativas. La teoría de la circulación en uso aborda esta condición de tráfico mixto como una superposición aditiva de corrientes con comportamiento diferente pero estable. La homogeneización se realiza mediante factores de equivalencia.

El objetivo de este trabajo es detectar si en presencia de flujos considerables de buses surgen fenómenos de interacción que se apartan de la hipótesis de aditividad. La atención se centra en dos variables: velocidad de recorrido y capacidad de intersecciones semaforizadas. Sobre ambas se recogió datos con procedimientos desagregados y confiables en calles de Santiago y Concepción.

Se encontró que los buses modifican el comportamiento de los autos de forma no aditiva. En las dos variables consideradas fueron identificados efectos de fondo y otros dependientes de la proporción de buses en el flujo. La incorporación de estos fenómenos implica generar nuevas especificaciones para relaciones velocidad-flujo y para la estimación de los parámetros de capacidad de intersecciones semaforizadas. En particular, en el último caso, es necesario redefinir la unidad de referencia pues el ADE carece de estabilidad en relación con la composición del tráfico. También se requiere corregir la definición de algunos factores de equivalencia. Basándose en los limitados experimentos realizados se sugieren algunos procedimientos al respecto.

1. INTRODUCCION

El tráfico en vías urbanas casi siempre presenta algún grado de heterogeneidad en la composición vehicular. Para recoger su impacto en diversos fenómenos característicos de la circulación, el procedimiento usual es emplear factores de conversión a un tipo de vehículo base, el automóvil particular.

Hay dos unidades de referencia frecuentes: el automóvil equivalente (veq o, en inglés, pcu) y el automóvil directo equivalente (ADE o, en inglés, tcu). Esta última está concebida especialmente para intersecciones. Entonces, hay dos clases de factores de equivalencia: por tipo de vehículo y por movimiento.

Este enfoque nació en el mundo desarrollado y supone estabilidad en el comportamiento de cada corriente vehicular, sobre todo en la de referencia. El supuesto es satisfactorio en dicho contexto, en que una porción abrumadora de los flujos está constituida por automóviles, y cuando no lo es, como ocurre en virajes con oposición, se están generando métodos que evitan el recurso a factores de equivalencia (Akcelik, 1987).

En el Tercer Mundo, hay muchas vías en que otros tipos de vehículo tienen un peso significativo. Es el caso de calles con altos flujos de buses, donde éstos llegan a ser incluso un 50% o más del tráfico total. En estas condiciones, cabe preguntarse si el procedimiento para recoger la heterogeneidad antes descrito conserva su validez. La duda surge principalmente en relación con el concepto de la unidad de referencia. Se comporta de igual manera un auto en calles con escasos o numerosos buses? De no ser así, se requiere una revisión de la aplicabilidad de los factores de equivalencia, ya que su valor sería dependiente de la composición del tráfico.

En consecuencia, el problema básico es determinar si el flujo mixto es bien representado por una superposición aditiva de corrientes componentes con características propias e independientes, o bien si estas corrientes son alteradas al interactuar. Este es el tema que se aborda en este trabajo, abarcando dos aspectos de la circulación: en tramos de vía, a través de relaciones velocidad-flujo, y en intersecciones semaforizadas, a través de parámetros de capacidad. El énfasis recae en la identificación de fenómenos de interacción no reconocidos en las teorías más difundidas.

En el capítulo 2 se aborda la especificación de relaciones velocidad-flujo en vías urbanas con tráfico mixto. El capítulo 3 está destinado al análisis de capacidad de intersecciones semaforizadas en esas condiciones. Las principales consecuencias de los resultados obtenidos en relación con la estabilidad de la unidad de referencia y los factores de equivalencia son discutidas en el capítulo 4. El capítulo 5 contiene las consideraciones finales que surgen de esta investigación.

2. RELACIONES VELOCIDAD-FLUJO

La circulación en tramos de vía no influídos por intersecciones es representada típicamente mediante una velocidad media de recorrido, que se hace dependiente del nivel de flujo existente y de la capacidad de la vía. Hay múltiples tratamientos propuestos para esta relación (véase Gibson, Jara-Díaz y Díaz, 1984) que coinciden en recurrir a un flujo equivalente como variable independiente. Esto supone, a través de un factor de equivalencia determinado, un efecto continuo sobre la velocidad media de los cambios en la composición vehicular. Para investigar la adecuación de este supuesto se hizo un conjunto de mediciones de velocidad y flujo en vías de similar capacidad pero con distinta proporción de buses y autos.

2.1. Trabajo experimental

Fueron seleccionados 5 tramos en calles de Concepción en los que no había fricción significativa con vehículos estacionados ni con cruces peatonales y las intersecciones en que no reciben prioridad permanente estaban a distancia considerable de sus extremos. En ellos se midió: tiempo de viaje de automóviles, flujo de buses y autos.

Los flujos fueron registrados de manera continua con un microcomputador portátil EPSON PX-8 y para los tiempos de viaje se usó el método de las patentes, con observadores situados en los límites de cada tramo. Para cada auto cuyo tiempo de viaje se midió, se identificó si tuvo interacción con buses. Se definió como situación de no-interacción cuando en ningún momento hubo un bus a menos de 5 m delante del automóvil. Esta identificación se hizo independientemente por cada observador bastando que uno de ellos detectara interacción para clasificar al auto en esta categoría. Los datos fueron agrupados por períodos de 2 minutos para que las velocidades medias correspondientes derivaran de

10 a 15 observaciones, en promedio.

Las Tablas 1 y 2 presentan, respectivamente, las características de los tramos empleados y las velocidades medias obtenidas.

TABLA N° 1
Tramos de medición de velocidad y flujo

CALLE	ENTRE	LONGITUD (m)	FLUJO (veh-h)	% BUSES
MAIPU	PRAT/SALAS	235	542	68
SAN MARTIN	PRAT/SALAS	190	329	57
FREIRE	PRAT/SALAS	250	342	40
CAUPOLICAN	SAN MARTIN/CHACABUCO	230	407	15
BULNES	COLO-COLO/TUCAPEL	205	425	0

TABLA N° 2
Velocidades de automóviles observados
(en km/h)

CALLE	VELOCIDAD MEDIA(1)		
	SIN INTERAC.	CON INTERAC.	TOTAL
MAIPU	35,6 (12,1)	26,9 (7,3)	31,6 (11,1)
SAN MARTIN	29,9 (6,5)	24,8 (4,4)	26,9 (7,2)
FREIRE	37,3 (6,5)	25,3 (5,4)	31,1 (8,7)
CAUPOLICAN	33,1 (12,5)	-	33,1 (12,5)
BULNES	45,6 (6,8)	-	45,6 (6,8)

(1) Entre paréntesis figura la desviación estándar.

Considerando que Caupolicán y San Martín tienen un ancho efectivo menor, se aprecia que:

- la velocidad media del conjunto de automóviles tiende a decrecer con la proporción de buses;
- hay una diferencia significativa (al 5% o menos) entre los vehículos sin y con interacción, en favor de los primeros;
- la velocidad de los vehículos con interacción tiene menor

varianza y parece depender muy poco del porcentaje de buses;

la velocidad de los vehículos sin interacción es influída por la proporción de buses. Como se adoptó, por razones prácticas, una definición restrictiva de interacción, es posible que este fenómeno sea, al menos en parte, aparente.

Es decir, la tendencia general de decrecimiento proviene de dos fuentes distintas. Por un lado, el efecto de los buses sobre los autos sin interacción y, por otro, el efecto sobre la proporción de autos sin y con interacción que tienen distintas velocidades medias.

Estos hallazgos conducen a pensar en un modelo de dos regímenes superpuestos antes que en el continuo tradicional.

2.2. Especificación de relaciones velocidad-flujo

En varios trabajos previos en el país se encontró grandes dificultades para obtener relaciones velocidad-flujo satisfactorias en calles con presencia importante de buses. Los resultados expuestos permiten presumir que ello se debe a una insuficiente comprensión del fenómeno, traducida en las especificaciones utilizadas. Nuevas formas que incorporan de alguna manera los dos tipos de efectos mencionados deberían mejorar los resultados. Lamentablemente, con las mediciones efectuadas no se logró construir bases de datos de tamaño suficiente para fines de estimación.

Sin embargo, para someter a prueba esta hipótesis, se recurrió a datos tomados en un tramo de Vicuña Mackenna, en Santiago, hace algunos años, en que hay una proporción importante de buses. El tramo es de 229 m y fueron registrados datos completos de tiempo de viaje de autos y flujos de buses y autos para 64 pelotones (Díaz, 1988). Una particularidad poco deseable para la finalidad propuesta es que hay un paradero de buses, que implica interacciones adicionales no analizadas aquí. Con todo, la calidad de los datos justifica su empleo, teniendo en cuenta esta limitación.

La especificación tradicional sería del tipo:

$$\frac{\bar{t}_A}{L} = a_1 + a_2 \frac{(q_A + b_1 q_p + b_2 q_B)}{L} \quad (1)$$

donde:

\bar{t}_A = tiempo medio de viaje de los autos del pelotón, en segundos;

L = longitud del tramo, en km;

q_A , q_p , q_B = flujo de autos, camiones y buses, en veh/pelotón;

a_1 , a_2 , b_1 , b_2 = parámetros a estimar.

Haciendo pie en los resultados de la sección anterior se postulará que hay relaciones distintas para autos sin y con interacción y que el peso relativo de cada una está en función de la proporción de buses en el pelotón. Además, que la cantidad de buses no influye en el tiempo de viaje de los autos con interacción. Esto es:

$$\frac{\bar{t}_A}{L} = (1-y)(a_1 + \frac{a_2(q_A + b_1 q_p + q_B)}{L}) + y(a'_1 + a'_2 \frac{q_A + b_1 q_p}{L}) \quad (2)$$

donde y ($0 < y < 1$) es la proporción de automóviles con interacción. Se supone aquí que para los autos sin interacción, camiones y buses tienen similar efecto.

Especificaciones más complejas, no lineales, presentaron dificultades de estimación por singularidades en los datos. Para estimar la ec. (2) fueron probadas diversas formulaciones para y, eligiéndose la siguiente:

$$y = \frac{q_B (1 + q_A) + q_{Bp}}{(q_B + q_p) (1 + q_A) + q_T} \quad (3)$$

donde q_{Bp} es el numero de buses de un pelotón que se detiene en el paradero y q_T es el total de vehículos de cada pelotón.

Los resultados de la estimación, efectuada con el programa TSP, figuran en la Tabla 3.

TABLA N° 3
Relaciones velocidad - flujo estimadas

COEFICIENTE	MODELO (*)	
	Ec. (1)	Ecs.(2) y (3)
a'_1	53.4 (13.7)	50.1 (4.3)
a'_2	-	55.1 (7.5)
a'_1	0.204 (5.3)	0.188 (1.6)
a'_2	-	0.226 (2.5)
b'_1	1.74 (1.6)	1.99 (1.9)
b'_2	0.726 (1.6)	-
R^2	0.34	0.34

(*) Estadígrafo t aparece entre paréntesis.

Estos resultados son alentadores. Aunque R^2 no varía y es bajo, por la influencia del paradero, tienen más sentido los coeficientes estimados con el nuevo modelo. De partida, se confirma que hay sólidas bases para suponer que hay relaciones distintas para autos sin y con interacción. Más importante aún, el factor de equivalencia asociado a los buses sería menor que 1 en el modelo convencional, cosa absurda, y es aproximadamente 2 en el

nuevo. Si se reestima la ec. (1) asignando un mismo coeficiente a.

3. CAPACIDAD DE INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

Los parámetros que definen la capacidad de una rama de intersección semaforizada son: pérdida en la partida (λ_1), ganancia de amarillo (λ_2), flujo de saturación básico (s_b) y factores de equivalencia (f_i). El tratamiento normal que se les otorga es asumir valores estándar para los dos primeros y un conjunto de valores, dependiente de las condiciones ambientales, para s_b . Para f_i , se distinguen factores asociados a virajes, que están en función del radio de giro si no hay oposición, y a tipo de vehículo, que se suponen estables para, al menos, cada ciudad.

Así, la capacidad Q queda dada por:

$$Q = s u \quad (4a)$$

$$u = (v + \lambda_2 - \lambda_1)/c \quad (4b)$$

$$s = \frac{\sum_i q_i}{\sum_i f_i q_i} s_b \quad (4c)$$

donde v es el periodo de verde para el movimiento, c es el tiempo de ciclo del semáforo y q_i es el flujo del movimiento i (caracterizado por tipo de vehículo y movimiento). Por simplicidad no están incorporados aquí factores de corrección por características geométricas de la pista.

En este contexto, la presencia de buses sólo influye por su peso relativo a través de la ecuación (4c). El parámetro s_b está ligado al ADE. La pregunta clave es si un automóvil directo se comporta de igual manera haya o no buses.

Para analizar la variación de los parámetros de capacidad con la proporción de buses en el flujo se recogió información de

terreno en calles sin buses y con ellos en grado diverso.

3.1. Trabajo experimental

El tipo de preguntas a responder exigía disponer de datos muy desagregados por lo que se recurrió a videogramaciones. Para poder establecer comparaciones apropiadas se buscó que la influencia diferencial de factores ambientales fuera reducida. Agregando el requisito de que haya suficientes vehículos en cola para obtener muestras de tamaño adecuado, sin que haya bloqueo u otras perturbaciones, ocurrió que varias de las grabaciones planificadas debieron descartarse. La base de datos finalmente empleada es la que se describe en la Tabla 4.

TABLA N° 4
Accesos considerados

CALLE	ESQUINA CON	Nº PISTAS	PISTAS ESTUDIADAS	% BUSES
Latadía	A. Vespucio	2	2	0
Pdte. Riesco	A. Vespucio	2	1	0
Tomás Moro	Apoquindo	2	1	0
C. Antúnez	P. de Valdívia	3	3	0
Estoril	Las Condes	4	1	15
San Martín	A. Pinto	2	2	30
San Diego	Avda. Matta	3	2	30
San Francisco	Avda. Matta	2	2	45

Todas estas calles están en Santiago, excepto San Martín, situada en Concepción.

Para cada una de las pistas estudiadas se midió, procesando en gabinete, los intervalos de salida de cada vehículo en cola, ignorando los 4 o 5 primeros, afectados por el período transiente. El intervalo se define por la pasada del parachoques trasero y se caracteriza por el tipo de vehículo y movimiento que realiza cada elemento y el que le precede, además de la pista empleada (numerada de derecha a izquierda, en el sentido de tránsito pertinente). Entonces, un intervalo se denota por hp_{xy}^{MN} donde p es el número de la pista, x es el tipo de vehículo antecesor y M el movimiento que éste realiza. Y y N son las variables homólogas para el vehículo cuyo intervalo es h .

Fueron considerados dos tipos de vehículos: automóviles (A) y buses (B), sin distinción entre microbuses y taxibuses. Las pistas seleccionadas contienen movimiento directo (D) o viraje a derecha (V).

También se tomaron los datos necesarios para estimar los parámetros por el tradicional método de regresión sincrónica.

3.2. Método de intervalos

Este método permite distinguir intervalos "puros" ($X=Y$ y $M=N$) del resto. En particular, analizar si los autos precedidos de buses o autos se comportan igual.

Primero se estudió las pistas sin buses. En ellas hay intervalos puros y mixtos de viraje y directo en la primera pista y puros directos en las otras. La Tabla 5 presenta los intervalos medios obtenidos.

TABLA N° 5.
Intervalos en calles sin buses
(en segundos)

CALLE	INTERVALO					
	h_1^{DV} AA	h_1^{VV} AA	h_1^{VD} AA	h_1^{DD} AA	h_2^{DD} AA	h_3^{DD} AA
Latadia	2.12	2.21	1.93	1.96	1.93	-
Presidente Riesco	2.35	2.19	2.10	1.96	-	-
Tomás Moro	2.20	2.20	1.87	2.04	-	-
Carlos Antúnez	2.16	2.12	2.02	1.92	1.79	1.82

Se observa a simple vista, y las pruebas estadísticas lo confirman, que no hay diferencia significativa entre intervalos puros y mixtos en la primera pista. Sin embargo, el intervalo de los autos directos es mayor en la primera pista que en las restantes. Es decir, en este caso el tráfico mixto (viraje-directo) parece implicar un efecto de fondo, no imputable a los intervalos mixtos en las muestras obtenidas. Es de carácter similar a los conocidos efectos de fricción.

El intervalo medio de los autos directos es de 1.97 seg en la pista derecha y 1.85 seg en las otras.

En las calles con buses se hizo un análisis separado para la pista derecha y las restantes, ya que en la primera hay mezcla de movimientos y tipos de vehículo y sólo de estos últimos en las otras pistas. No se pudo obtener muestras de tamaño suficiente de todos los intervalos posibles según la clasificación adoptada. Las Tablas 6 y 7 muestran los intervalos medios que se pudo calcular en la pista derecha y las restantes, respectivamente.

TABLA N° 6
Intervalos en pista derecha con buses
(en segundos)

CALLE	VIRAJE				DIRECTO		
	h_{AA}^{VV}	h_{AA}^{DV}	h_{BA}^{DV}	h_{AA}^{DD}	h_{AA}^{VD}	h_{BB}^{DD}	h_{AB}^{VD}
Estoril	2.34	2.28	2.80	2.10	1.95	4.39	3.78
San Martín	2.41	2.12	2.85	1.95	1.89	4.06	3.79
San Diego	2.30	2.36	2.78	2.06	2.05	4.25	4.11
San Francisco	2.47	2.35	2.91	2.20	2.10	4.00	3.98

TABLA N° 7
Intervalos en otras pistas con buses
(en segundos)

CALLE	INTERVALO			
	h_{AA}^{DD}	h_{BA}^{DD}	h_{BB}^{DD}	h_{AB}^{DD}
Estoril	2.04	2.26	4.10	4.05
San Martín	2.02	2.30	-	3.60
San Diego	2.12	2.20	3.83	3.88
San Francisco	2.35	2.48	-	3.84

De estas Tablas y pruebas estadísticas adicionales surgen como principales conclusiones las siguientes:

- los intervalos de los autos directos y que viran son significativamente mayores en calles con buses que en calles sin buses;
- más aún, los intervalos bus-auto son significativamente mayores que los auto-auto, tanto para movimiento directo como para el viraje a la derecha;

- en cambio, la diferencia entre los intervalos auto-bus y bus-bus no es est disticamente significativa y decrece en magnitud con la proporción de buses en la pista;
- la magnitud de los intervalos puros no muestra una tendencia definida en función de la proporción de buses.

En suma, se detecta que los buses afectan apreciablemente el comportamiento de los automóviles por dos vías. Una es una especie de efecto de fondo, análogo al encontrado en calles sin buses, asociado a la existencia misma de tráfico mixto. La segunda consiste en que a mayor proporción de buses aumentará el peso relativo de los intervalos mixtos, que son de mayor duración.

3.3 Método de regresión sincrónica

En su formulación usual este método no distingue intervalos según vehículo precedente. No obstante, se empleó adicionalmente con dos propósitos: obtener estimadores de λ_1 y disponer de un instrumento de validación de las conclusiones anteriores, en que se controla el efecto del período transiente, cuya duración podría ser mayor que la adoptada para medir los intervalos, lo que introduciría sesgo.

Para cada pista considerada se estimó por regresión λ_1 y los intervalos medios de autos virando (cuando existen), autos directo y buses directo. Por no haber saturación suficiente, no se estimó λ_2 . Se hizo luego una agrupación de pistas según el porcentaje de buses en el flujo y se obtuvo el promedio ponderado del valor de cada parámetro para cada grupo. Los resultados figuran en la Tabla 8. Los estadígrafos de la regresión fueron, en todos los casos, muy satisfactorios.

TABLA N° 8
Parámetros estimados por regresión
(en segundos)

% BUSES	λ_1	h_A^V	h_A^D	h_B^D
0	2.0	2.09	1.85	-
< 15	1.3	2.42	2.05	4.08
35 - 40	2.8	2.34	2.00	3.81
45 - 50	3.7	2.59	2.19	3.95

Estos valores son consistentes con lo encontrado con el método de intervalos. Cabe destacar que la categoría 35-40% de buses está muy influida por las pistas de la calle San Martín, por las que circulan sólo taxibuses, lo que explica el menor valor de los intervalos.

Se aprecia también que λ_1 tiende a crecer con la proporción de buses. Es lógico, por la menor capacidad de aceleración de éstos. Y es ciertamente interesante la estabilidad que se observa en el intervalo de los buses, que es más sensible a la composición entre microbuses y taxibuses que a la entre ellos y los autos.

Finalmente, los valores absolutos de los intervalos están en alta consonancia con los entregados por el método más desagregado.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Unidad de referencia

Los experimentos descritos en el capítulo precedente aportan evidencia sustantiva de que la condición de tráfico mixto incide en el comportamiento del automóvil directo, tradicional unidad de referencia. Su intervalo de salida crece con el porcentaje de buses en el flujo, incluso lo hace cuando hay autos virando. Una unidad de referencia inestable, cuyo comportamiento depende de la composición del tráfico, es la negación de ese concepto. Curiosamente, el intervalo de salida de los buses se muestra estable. A juzgar sólo por estos datos, sería preferible que éstos sean la unidad de referencia en vez de los autos. Pero esto es poco conveniente en la práctica.

Este fenómeno no había sido reportado en la literatura consultada. Más aun, Kimber et al. (1985) afirman explícitamente no haber encontrado diferencia significativa entre intervalos auto-auto y otros mixtos. Es posible que ello se deba a la escasa proporción de vehículos pesados en sus datos (7%).

Una consecuencia práctica importante de la variación del intervalo característico de los autos directos es que se refleja en el valor del flujo de saturación básico, parámetro clave en la modelación de tráfico.

Estudios empíricos previos en Santiago arrojaron valores diferentes para s_t , que habían sido atribuidos a factores ambientales (Coeymans y Polanco, 1981; Gibson et al., 1982; Gálvez y Martínez, 1984). De ellos se ha derivado una clasificación usada como estándar:

- pistas en zona céntrica : 1667 ADE/h - pista
- pistas normales : 1848 ADE/h - pista
- pistas de alta capacidad : 2050 ADE/h - pista.

Pero sucede que esta clasificación se corresponde bien con una según proporción decreciente de buses (nula en el último caso). Tomando los resultados del método de intervalos para pistas con alta proporción de buses, proporción mediana y pistas sólo de autos directos, los flujos de saturación básicos respectivos son:

- pistas con alta proporción de buses: 1644 ADE/h - pista ($h=2,19$ seg)
- pistas con mediana proporción de buses: 1837 ADE/h-pista ($h=1,96$ seg)
- pistas de autos directos: 1946 ADE/h-pista ($h=1,85$ seg).

Es notable el paralelo entre ambas clasificaciones. Pero la explicación que les subyace es muy distinta y parece claramente más sólida la aquí ofrecida.

El status privilegiado del automóvil directo queda pues seriamente cuestionado donde hay tráfico mixto, como en nuestras ciudades. Una salida posible al problema es restringir más la definición de la unidad de referencia: auto directo en pistas sólo

de autos directos. Esto implica la aparición de un nuevo factor de equivalencia para autos directos en pistas de uso combinado.

4.2. Factores de equivalencia en intersecciones semaforizadas

Varios autores, notablemente Kimber et al. (1985), han planteado que los factores de equivalencia deben ser calculados como cuociente de los intervalos medios de salida pertinentes y que el método de regresión sincrónica es una buena manera de estimar estos intervalos.

Con los datos presentados en el capítulo 3 se calculó el factor de equivalencia de los virajes a derecha en pistas sin y con buses, basándose en intervalos medidos directamente y estimados por regresión sincrónica. Dado que los intervalos puros y mixtos difieren, se aplicó en el primer caso la corrección de Scraggs (1964).

En pistas sin buses, hay gran estabilidad en torno a una media de 1.12 y en las con buses, el cuociente es también muy estable pero en torno a 1.21. Estos valores son prácticamente idénticos a los que resultan del método de regresión, corroborando lo afirmado en investigaciones previas. Pero es sugerente que a pesar de la similitud de radios de giro, los factores difieren al haber buses presentes en la pista. Es éste otro fenómeno no detectado antes.

En cuanto a factores por tipo de vehículo, es evidente que si se siguen los procedimientos tradicionales se llega a resultados extraños. Como el intervalo medio de los buses es estable y no lo es el de los autos directos, el factor de los buses se hace variable con su proporción. Cuanto más buses en el flujo, menor es su factor de equivalencia (y menor también s_b).

Nuevamente, el sentido original de los factores de equivalencia se pierde al ser dependientes de la composición. La redefinición de la unidad de referencia permitiría devolverles estabilidad.

4.3. Factores de equivalencia en relación velocidad-flujo

El uso de una especificación tradicional conduce también, como se vio en la sección 2.2, a un valor absurdo del factor de equivalencia de los buses. Si, en cambio, se genera otra especificación a partir de las características observadas de la

influencia de los buses sobre los autos, se llega a cifras sensatas. No obstante, debe tenerse en cuenta en este caso que el parámetro b_1 no es directamente interpretable como el que recoge el efecto de los buses. La ec. (2) puede reescribirse de forma análoga a la (1) como sigue:

$$\frac{t_A}{L} = \frac{a'_1 + (a'_1 - a_1)y + |a'_2 + (a'_2 - a_2)y| \frac{q_p + |b_1/(1 + \frac{a'_2}{a_2(1-y)})| q_B}{a'_2}}{L} \quad (5)$$

donde se ve que el factor de equivalencia, en sentido clásico, sería

$$b_1/(1 + \frac{a'_2 y}{a_2(1-y)}), \text{ valor que varía con la proporción de autos con}$$

interacción (y) que depende de la proporción de buses en el flujo. Esto es causado por el hecho de que la acción de los buses discurre por un camino directo y otro indirecto, tema ya discutido en la sección 2.2. Es entonces necesario repensar la definición de lo que es un factor de equivalencia en cuanto al efecto sobre la velocidad, especialmente cuando se aplican valores estándar.

5. CONSIDERACIONES FINALES

La investigación aporta evidencia de que existen fenómenos de interacción de buses y autos que no son bien recogidos por los métodos tradicionales, desarrollados en lugares en que el tráfico mixto es escaso.

Lo esencial es que la presencia de buses implica más que superponer aditivamente corrientes vehiculares con una conducta diferente pero estable e independiente. Los buses modifican el comportamiento de los autos. Esta modificación afecta la manera de estimar variables claves como la velocidad y los parámetros de capacidad en intersecciones semaforizadas.

Si bien los indicios señalados sobre fenómenos de interacción complejos están bien fundados, los experimentos de los que surgen son limitados en magnitud como para deducir generalizaciones de validez defendible.

A su vez, los sencillos procedimientos sugeridos para incorporar estos fenómenos mediante cambios de especificación de las relaciones corrientemente empleadas en ambos terrenos, sólo pueden considerarse como hipótesis de trabajo.

El prominente papel que desempeñan la velocidad y la capacidad en los modelos en que se apoya la toma de decisiones sobre proyectos de transporte urbano, justifica que se emprendan investigaciones más ambiciosas en este tema.

No se trata sólo de que con la teoría expuesta en este trabajo se pueda llegar a mejores valores de los parámetros. Está también en juego la comprensión de hechos que hasta ahora carecían de explicación sistemática. Por ejemplo, que la segregación de buses y autos implica aumentos de capacidad para estos últimos superiores a los que predicen los métodos convencionales. Esto puede conducir a la aparición de medidas hasta ahora no utilizadas pero que son adecuadas a la condición de tráfico mixto.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada principalmente por un subsidio del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, proyecto 286-87. Los autores están reconocidos a Rodrigo Torres, quien dirigió y procesó gran parte de las mediciones, Mónica Woywood, quien proporcionó gentilmente algunas videogramaciones, al Dr. Sergio Jara, que facilitó programas computacionales para estimación de estadística, y al Dr. Luis Willumsen, que aportó valiosos comentarios. A ellos corresponde una parte de los aciertos que puede haber en el trabajo pero ninguna en los errores u omisiones, propiedad exclusiva de los autores.

REFERENCIAS

AKCELIK, R. (1987) Estimating the capacity of a shared lane. Third Mini Euro Conference on Operating Research Methods in Transport Planning and Traffic Control, 16-19 Junio 1987. Herceg Novi.

COEYMAN, J.E. y POLANCO, M.T. (1981) Flujos de saturación y vehículos equivalentes en Santiago. Documento de Trabajo 36. Departamento de Ingeniería de Transporte, P. Universidad Católica de Chile. Santiago.

DIAZ, R. (1988) Estimación de relaciones velocidad-flujo en vías urbanas. Memoria de Título de Ingeniero Civil Industrial. Universidad de Chile.

GALVEZ, T. y MARTINEZ, F. (1984) Flujos de saturación en la zona céntrica de Santiago. Actas del Primer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile, 7-9 Mayo 1984. Santiago.

GIBSON, J., SAAVEDRA, A. y SPOERER, J.P. (1982) Metodología para la programación de redes de semáforos de tiempos prefijados. Publicación ST-INV/01/82, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.

GIBSON, J., JARA-DIAZ, S.R. y DIAZ, R. (1984) Predicción de la velocidad media a partir de flujos agregados en vías urbanas. Actas del Primer Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Universidad de Chile, 7-9 Mayo 1984. Santiago.

KIMBER, R.M., McDONALD, M. y HOUNSELL, N. (1985) Passenger car units in saturation flows: concept, definition, derivation. *Transportation Research B*, Vol. 198B(1), 39-61.

SCRAGGS, D.A. (1964) Determination of the passenger car equivalent of a goods vehicle in single lane flow at traffic signals. Road Research Laboratory, Report LN/573/DAS.