

## **AJUSTE DE CONTEOS VEHICULARES PARA APROXIMACIÓN DE DEMANDA REAL, EN REDES SEMAFORIZADAS Y CONGESTIONADAS**

Jaime Moya, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), [jfmoya@ing.puc.cl](mailto:jfmoya@ing.puc.cl)  
Marina Dragicevic, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), [mdp@ing.puc.cl](mailto:mdp@ing.puc.cl)  
Matías Navarro, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), [minavar1@uc.cl](mailto:minavar1@uc.cl)  
Juan Carlos Herrera, Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia  
Universidad Católica de Chile, [jch@ing.puc.cl](mailto:jch@ing.puc.cl)

### **RESUMEN**

Los estudios de tráfico vehicular utilizan como principal dato de entrada flujos vehiculares medidos en terreno. Sin embargo, en intersecciones semaforizadas con condiciones congestionadas, lo que se mide realmente es la capacidad y no la demanda vehicular real, afectando después modelos de microsimulación construidos con estas mediciones. En este trabajo se propone una nueva metodología para aproximar la demanda, ajustando los flujos medidos en terreno, para replicar tiempos de viaje observados. Al aplicar la metodología, se pudo corregir diferencias de hasta un 47% en el ajuste de tiempos de viaje.

*Palabras clave: conteos, demanda, microsimulación.*

### **ABSTRACT**

Traffic studies generally use traffic counts as input data. However, when traffic flow is measured at traffic light intersections during congestion, we measure capacity instead of demand, affecting microsimulations that use these data as input data. In this paper, a new methodology is proposed in order to better estimate traffic demand, adjusting the traffic flow observed in order to replicate measured travel times. By applying this methodology, differences of up to 47% in the adjustment of travel times were corrected.

*Keywords: counts, demand, microsimulation*

## **1.- INTRODUCCIÓN**

Los estudios que analizan redes viales y proyectos de transporte utilizan como principal dato de entrada los flujos vehiculares del área de influencia. Estos conteos son utilizados para elaborar modelos de diferente escala que evalúan impactos de proyectos de transporte, como modelos estratégicos que involucran importantes reasignaciones de flujo a nivel ciudad, o modelos de microsimulación que estiman impactos de medidas operativas.

En la práctica, en intersecciones semaforizadas, las mediciones de flujo vehicular se realizan en las líneas de parada. Sin embargo, si la intersección se encuentra en condiciones congestionadas (i.e. presencia de colas), lo que realmente se mide es la capacidad de descarga del respectivo movimiento o acceso, y no su demanda real de vehículos. Esto además tiene la salvedad de cumplirse sólo si no hay cola proveniente de aguas abajo que bloquee la descarga, ya que en ese caso tampoco se mide la capacidad de descarga real, sino una cota inferior de ella.

Al medir capacidad y no demanda de la intersección, se producen inconsistencias en los modelos al subestimar el número total de vehículos que utilizan la intersección. Esto se traduce en microsimulaciones que no replican las condiciones de congestión observadas en terreno.

Este artículo propone una nueva metodología que tiene como objetivo la elaboración de modelos de microsimulación que repliquen de mejor manera la situación base de la red estudiada, mediante una estimación de la demanda real. La metodología expuesta en este trabajo aplica para redes pequeñas con intersecciones semaforizadas, congestionadas y suponiendo la capacidad en la línea de parada como constante, es decir, sin bloqueos por colas provenientes de aguas abajo u otro fenómeno que provoque caídas de capacidad.

Existen otras alternativas para disminuir la brecha entre las mediciones de flujo y la demanda real, que también se describen en este trabajo. La metodología aquí propuesta, a diferencia de las alternativas mencionadas, permite aproximar la demanda mediante la replicación de los estados de tráfico y no requiere recursos adicionales para ello.

En la sección siguiente se presentan los principales conceptos de tráfico que se tratan en este estudio. Luego, en la sección 3, se discute sobre los problemas existentes en los estudios actuales al utilizar directamente los flujos contados en terreno en modelos de microsimulación u otros. Se aborda la diferencia entre la capacidad y la demanda real, y algunas alternativas que existen para poder acortar esta brecha. En la Sección 4 se detalla la metodología y la información necesaria para su desarrollo. Una aplicación de la metodología se muestra en la Sección 5. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones y temas a abordar en trabajos futuros.

## **2.- CONCEPTOS GENERALES DE TRÁFICO**

Como se mencionó anteriormente, lo medido en la línea de parada de intersecciones semaforizadas, en condiciones congestionadas, es la capacidad del respectivo acceso y no su demanda real. En la Tabla 1 y Figura 1, se definen e ilustran los tres principales conceptos utilizados en este trabajo.

Tabla 1: Definiciones generales.

Concepto	Definición
Demanda	Cantidad de vehículos que desea pasar por un determinado punto por unidad de tiempo.
Capacidad	Máxima cantidad de vehículos que pueden pasar por un punto por unidad de tiempo y depende de numerosos factores como el número de pistas, el reparto del semáforo y la composición del flujo vehicular, entre otros.
Descarga	Cantidad de vehículos que efectivamente pasan por un punto por unidad de tiempo.

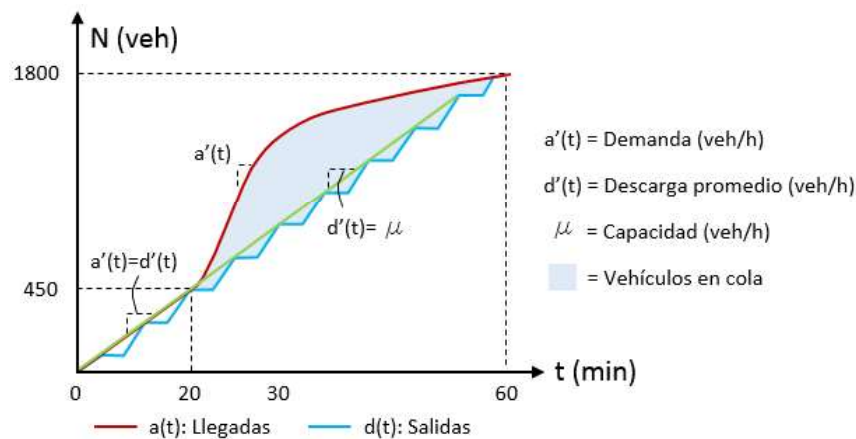


Figura 1: Relación entre Capacidad, Demanda y Descarga.

En la Figura 1 se puede apreciar la relación entre demanda ( $a'(t)$ ), capacidad ( $\mu$ ) y descarga promedio ( $d'(t)$ ) (Daganzo, 2003), donde en color azul se representan las colas de vehículos. Teóricamente, se tienen los siguientes casos:

- $0 \leq t < 20$ : Mientras la demanda  $a'(t)$  que llegue a una intersección sea inferior a la capacidad  $\mu$  y no existan colas de vehículos, los conteos realizados medirán efectivamente la demanda, pues  $a'(t) = d'(t)$ .
- $20 \leq t < 30$ : Cuando la demanda es mayor a la capacidad ( $a'(t) > \mu$ ), ya no es posible evacuar todos los vehículos y se forman colas. La descarga  $d'(t)$  se iguala a la capacidad  $\mu$ . Si bajo estas condiciones se realizan mediciones, quedan vehículos en cola que no son contados.
- $30 \leq t$ : Si la demanda es inferior a la capacidad ( $a'(t) < \mu$ ) pero existe cola, se seguirá midiendo descarga hasta que dicha cola desaparezca.

### 3.- METODOLOGÍA ACTUAL DE CALIBRACIÓN Y MEDICIÓN

En esa sección se revisan los procedimientos comúnmente utilizados para calibrar los modelos de microsimulación, describiendo las limitaciones y problemáticas que surgen por mal utilizar los conteos de flujo al asumir que son demanda en casos en que reflejan capacidad. Además, se exploran algunas alternativas para obtener una aproximación de la demanda real, destacándose las principales dificultades que hacen que terminen por no aplicarse en estudios.

### 3.1.- Problemas actuales para la calibración de modelos de microsimulación

La etapa de calibración del modelo consiste en ajustar los parámetros a fin de que replique de forma correcta la situación observada en la realidad. Para determinar qué tan bien replica la situación actual se utilizan los flujos, velocidades (o tiempos de viaje) y/o el largo de las colas. Si el valor simulado para estas variables es similar al valor observado, se dice que el modelo está calibrado.

#### 3.1.1. Flujo

Los modelos que se utilizan para evaluar proyectos viales se calibran en base a conteos de flujo. Estos conteos suelen medirse en condiciones congestionadas, pues lo que interesa es analizar los horarios más complejos para la operación. Sin embargo, al ingresar directamente estos flujos a un simulador de tráfico, sin otro tipo de análisis, se pueden observar redes con poco flujo, ya que se subestima la demanda real de vehículos. En este caso, el modelo no debería reproducir los niveles de congestión observados, puesto que se está ingresando exactamente el flujo que fue capaz de descargar el semáforo de la intersección analizada. Así, tal como menciona Zito et al. (2011), si bajo este escenario el modelo muestra grandes demoras y bajo nivel de servicio, es porque está incorrecta la modelación de la capacidad de descarga de la red. Es decir, la calibración del modelo utilizando flujos se ve afectada si el flujo medido a través de los conteos corresponde a la capacidad y no a la demanda real.

Si bien los estadísticos de calibración pueden indicar buenos niveles de ajuste, estos indicadores se basan en los flujos obtenidos mediante conteos, nuevamente ignorando cuál es la demanda real que desea utilizar la red. En la Ecuación 1 se muestra el GEH, uno de los estadísticos más utilizados.

$$GEH = \sqrt{\frac{(q_{obs} - q_{sim})^2}{0,5 * (q_{obs} + q_{sim})}} \quad (1)$$

donde

$q_{obs}$  = flujo vehicular observado en el período considerado

$q_{sim}$  = flujo vehicular simulado en el período considerado

Este indicador compara el flujo vehicular observado con el flujo simulado. Sin embargo, como se menciona anteriormente, el flujo observado no refleja realmente la demanda sino la capacidad del movimiento. Por esto, debe tenerse claro que es incorrecto interpretar este indicador como medida de ajuste respecto a la demanda, en situaciones congestionadas. En cambio, lo que realmente se estaría midiendo es el ajuste del modelo respecto a la capacidad o la oferta de la intersección. Si bien esta información es valiosa, no se debe confundir con la demanda.

#### 3.1.2. Velocidad o tiempos de viaje

En la etapa de recolección y levantamiento de datos de los proyectos viales, además de los flujos, generalmente se realizan mediciones de velocidad (o tiempos de viaje) en los ejes de la red

estudiada. Esto con el objetivo de comparar los tiempos de viaje observados y simulados en el proceso de calibración (Zúñiga, 2010).

Si la velocidad simulada no es similar a la registrada en terreno, se pueden ajustar los parámetros para replicar de manera más adecuada el comportamiento de los vehículos (FHWA, 2004). Un error común es ajustar los parámetros de velocidad máxima igualándolos a las velocidades registradas en terreno. Esto no es correcto, pues los parámetros de velocidad máxima incluidos en microsimuladores deben ajustarse para representar la velocidad máxima en flujo libre y la velocidad máxima permitida.

El origen del problema nuevamente puede tener relación con no medir demanda real. Si en un eje muy congestionado se mide flujo y velocidad, se registrarán valores bajos para ambas variables. Por lo tanto, al ingresar como demanda los flujos medidos a la red, es probable que los vehículos circulen a velocidades de flujo libre y no se observe congestión. Con esta situación, se puede cometer el error de intentar replicar las velocidades observadas en terreno modificando los parámetros de velocidad máxima, llevándolos a la velocidad de flujos en cola. Al hacer esto, se obtienen situaciones poco realistas en el simulador, como vehículos circulando a bajas velocidades en ejes prácticamente vacíos.

Lo anterior puede ser entendido mirando el diagrama fundamental del tráfico, que relaciona velocidad ( $v$ , km/h), flujo ( $q$ , veh/h) y densidad de vehículos ( $k$ , veh/km). Un ejemplo de este diagrama (relación triangular) se muestra en la Figura 2.

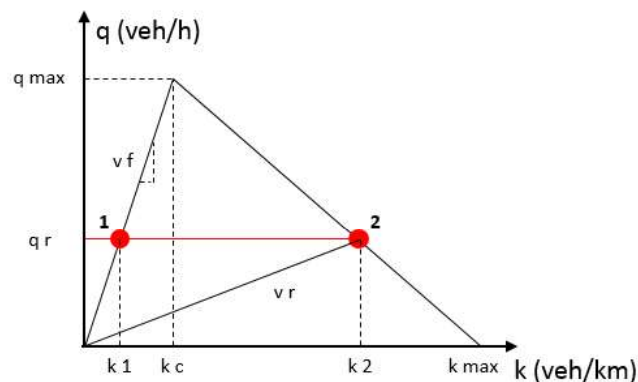


Figura 2: Diagrama fundamental del tráfico.

Cuando se realizan mediciones de flujo y velocidades en condiciones congestionadas (es decir, para valores de  $k > k_c$ ), se obtienen valores bajos para  $q$ , que pueden ser malinterpretados. En la Figura 2 se observa que, para un mismo flujo  $q_r$ , existen dos combinaciones de  $v$  y  $k$ , que se dan en los puntos marcados como 1 y 2: ( $q_r, v_f, k_1$ ) y ( $q_r, v_r, k_2$ ). Si al microsimulador utilizado se ingresa el valor  $q_r$  como demanda y se ignora el valor de  $k$ , podría darse la situación antes mencionada de tener redes vacías (ya que  $q_r < q_{max}$ ) y tener que asignar velocidades inferiores a las de flujo libre ( $v_r$  en vez de  $v_f$ ) para replicar la situación en terreno. En resumen, aplicar ( $q_r, v_r, k_1$ ) es incorrecto, puesto que es una relación no factible entre los valores que componen la relación fundamental.

### 3.1.3. Colas

Otro parámetro utilizado para calibrar los modelos es comparar las colas observadas con las simuladas. Un indicador utilizado para ello es el que se muestra en la Ecuación 2, tal como plantea Zúñiga (2010).

$$I.D. = \sum_{i=accesos} \frac{|cola_{obs,i} - cola_{sim,i}|}{cola_{obs,i}} * \frac{cola_{obs,i}}{cola_{obs,red}} \quad (2)$$

donde

$cola_{obs,i}$  = Cola observada en el acceso  $i$

$cola_{sim,i}$  = Cola simulada en el acceso  $i$

$cola_{obs,red}$  = Cola observada en la red

Mientras más cercano a cero sea el indicador, mejor es la calibración, ya que existe una menor diferencia entre la cola observada y la cola simulada en cada acceso. Este valor se encuentra escalado por el peso de la cola en la red, representado por el segundo término de la ecuación.

En las condiciones antes expuestas, los valores de  $cola_{sim,i}$  serán cero para todos los accesos, debido a que los flujos ingresados representan la capacidad de descarga de los movimientos, y por lo mismo no debiesen formarse colas en el modelo.

### 3.2.- Alternativas actuales para determinar la demanda real

El siguiente listado detalla formas para aproximar la demanda real de una intersección, indicando también las principales limitaciones de cada una:

- Extender la hora de medición hasta el momento en que la congestión desaparezca (FHWA, 2004): Esto permite, en principio, considerar todo el flujo que busca acceder a la intersección. Sin embargo, el problema de esto es que puede generar distorsiones en el comportamiento espacial o temporal de las colas en el modelo (podría no llegar a formarse colas en la microsimulación). Además, la extensión horaria aumenta los costos del estudio.
- Si es una intersección puntual, se pueden realizar mediciones aguas arriba, donde no haya congestión, para intentar determinar el flujo real de vehículos que accede al punto de conteo en cuestión (Zito et al., 2011). Si es evidente que aguas arriba los vehículos circulan con fluidez y no hay otro cuello de botella visible, entonces este método es bastante recomendado para solucionar el tema de la demanda real. Sin embargo, muchas veces el largo de cola excede la distancia del arco a la próxima intersección. Adicionalmente, la inclusión de intersecciones adicionales podría aumentar los costos de medición.
- Serie de intersecciones (corredor, eje de interés): Cuando se realizan conteos de flujo independientes en intersecciones a lo largo de un eje, comúnmente se observan inconsistencias. Esto puede deberse a escapes o ingresos de vehículos a mitad de cuadra. Otra posibilidad es que existan colas en algunos tramos, lo que explica la diferencia mencionada (vehículos que no están siendo capaces de descargar). Acá se sugieren dos soluciones: tal como en el caso de una intersección aislada, se deben realizar los conteos desde antes que empiece la congestión (aparición de colas) hasta el momento en que se

acabe esta congestión (FHWA 2004); el otro método es asumir los conteos más grandes, y a partir de esos, ir aumentando el flujo aguas abajo (llamado “*flow balancing*” o balanceo de flujos) (Zito et al., 2011). Nuevamente, pueden existir dificultades operativas (por ejemplo, que no esté claro hasta dónde llegan las colas), o restricciones presupuestarias, pues es necesario medir por más tiempo o un mayor número de intersecciones.

- Especificación de la demanda vía matrices O/D (AUSTROADS, 2006): Las matrices permiten considerar la potencial demanda. Sin embargo, en el caso de una red compleja, también se requiere un modelo de asignación de viajes a las distintas rutas. Ahora bien, para estudiar una sola intersección, no se justifica la elaboración de una matriz O/D.

Como puede verse, si bien los métodos presentados pueden ayudar a determinar la demanda real en ciertos casos, existen complicaciones operativas o restricción de recursos que impiden realizar todas las mediciones requeridas apropiadamente. En la siguiente sección se presenta un nuevo enfoque que permite hacer una aproximación de la demanda, que no requiere recursos adicionales y es de sencilla aplicación, cuyo objetivo es replicar la realidad de forma más precisa.

#### **4.- METODOLOGÍA PROPUESTA**

El objetivo de esta metodología es replicar las condiciones operativas que se dan en la realidad, para así contar con un modelo base más preciso para apoyar la toma de decisiones. La variable principal por la cual se hace esta replicación es la velocidad y/o tiempos de viaje en rutas o tramos seleccionados, y como variable secundaria el largo de las colas.

Se apunta a obtener perfiles estimados de demanda, que puedan replicar y explicar de mejor manera la magnitud y variación de las velocidades y colas registradas en terreno, sorteando así todas las dificultades ya expuestas que surgen al utilizar sólo los flujos obtenidos a partir de conteos. Sin embargo, la determinación del valor exacto de las demandas no es posible, porque diferentes perfiles de demanda, tanto en magnitud como extensión temporal, pueden dar como resultado ciertos valores para las velocidades y el largo de las colas.

A continuación se presenta la metodología propuesta, explicando la información requerida, el procedimiento para su implementación y las condiciones que deben cumplirse para su aplicación.

##### **4.1.- Información requerida**

La información necesaria para la aplicación de la metodología es similar a la utilizada en los estudios actuales, y considera los elementos que se explican a continuación.

##### **4.1.1.- Flujos de saturación y porcentajes de viraje**

Las mediciones de conteos de flujo, tanto de vehículos particulares como de buses, se usan como punto de partida en la modelación. Esta información se utiliza para estimar la capacidad de la intersección en situaciones congestionadas donde existe cola excedente durante el período de

medición. Con esto, se estiman los flujos de saturación, que corresponde a la cantidad de vehículos que son capaces de pasar por cierto punto de referencia, comúnmente la línea de detención de una intersección semaforizada, durante cierto período de tiempo. Para este estudio, se considerarán sólo casos en que existen condiciones de flujo libre aguas abajo de la intersección, sin bloqueos que entorpezcan la descarga. De esta forma, la capacidad en la línea de parada se asumirá constante, y con un valor teórico igual al flujo de saturación por pista (de 1.800 vehículos por hora por pista), multiplicado por el número de pistas y el porcentaje de reparto en el semáforo.

En el caso de bloqueos aguas abajo, no es posible estimar el flujo de saturación directamente a partir de los conteos, y la capacidad en la línea de parada no es constante. De todas formas, para esos casos, se sugiere considerar un flujo de saturación en torno a los 1.800 vehículos por hora por pista.

Una vez calibrado el flujo de saturación de la intersección, se deben ingresar los porcentajes de viraje. Si no existen bloqueos aguas abajo de la intersección (como es el caso de este estudio), estos porcentajes se determinan a partir de los conteos de flujo.

#### **4.1.2.- Largos de cola**

Los largos de cola deben ser medidos con toda la precisión posible a partir de las condiciones presentes en terreno. El valor registrado debe ser la longitud máxima observada en cada ciclo de semáforo.

#### **4.1.3.- Velocidades o tiempos de viaje**

Las velocidades (o tiempos de viaje) son necesarias para utilizarlas posteriormente en el proceso de calibración. Éstas pueden ser medidas de diferentes formas, como por ejemplo usando el método del vehículo flotante, a partir de emisiones WiFi/Bluetooth, emisiones GPS, etc.

### **4.2.- Metodología de ajuste de conteos en microsimulaciones**

La metodología de ajuste de conteos consiste en tres pasos principales: calibración de flujos de descarga, calibración de tiempos de viaje (velocidades), y revisión de colas y comportamiento general del modelo. En términos generales, se siguen los procedimientos utilizados actualmente en la metodología tradicional para las microsimulaciones, modificándose principalmente el procesamiento de los flujos vehiculares. Para que la metodología sea válida, debe cumplirse que existan condiciones congestionadas, que la intersección o grupo de intersecciones estén semaforizadas, y que no existan bloqueos de la descarga en la línea de parada.

#### **4.2.1.- Calibración de flujos de descarga**

La calibración de los flujos de descarga consiste en que el modelo represente correctamente la cantidad de vehículos que son capaces de pasar por cierto punto de referencia, comúnmente la línea



de detención de una intersección semaforizada, durante cierto período de tiempo. Esta calibración es fundamental en un modelo de microsimulación, ya que si se replican valores mayores a los observados en terreno, es posible que en el modelo no se observen colas, mientras que si se replican valores menores, falsos cuellos de botella podrían ser simulados. Es necesario, también, conocer en detalle las programaciones semafóricas de la o las intersecciones estudiadas.

Como indicador de ajuste de calibración para los flujos de descarga, se propone el expuesto en la Ecuación 3 (NSW, 2013):

$$0,9 * fdes_{obs,i} \leq fdes_{sim,i} \leq 1,1 * fdes_{obs,i}, \forall i \in A \quad (3)$$

donde

$fdes_{obs,i}$  = Flujo de saturación observado en veh/h, en la línea de parada  $i$

$fdes_{sim,i}$  = Flujo de saturación simulado en veh/h, en la línea de parada  $i$

$A$  = Conjunto de líneas de parada simuladas

Es decir, todos los flujos de descarga en las líneas de parada simuladas deben estar dentro del 10% de los observados en terreno.

Para ajustar el flujo de descarga, se pueden modificar algunos parámetros. En caso de utilizar el microsimulador Aimsun, estos parámetros son el tiempo de reacción y tiempo de reacción en reposo (Zúñiga, 2010).

#### **4.2.2.- Calibración de tiempos de viaje (o velocidades)**

Una vez calibrados los flujos de descarga, se procede a calibrar los tiempos de viaje para aquellos movimientos congestionados, utilizando como base los flujos obtenidos mediante conteos. Para ajustar los flujos, éstos se aumentan hasta replicar las velocidades reales.

El objetivo de este proceso es la obtención de perfiles de demanda, creados a partir de los conteos y el aumento progresivo de los flujos, a fin de que repliquen las velocidades objetivo. El nivel de precisión de los perfiles, en cuanto a la captura de variaciones temporales de la demanda, dependerá de la periodización que se utilice. A períodos más pequeños, es posible capturar con mayor detalle las variaciones de la demanda a lo largo de un intervalo de tiempo dado.

La definición del largo de los períodos dependerá de cada estudio en particular, pero se sugiere que sean breves, por ejemplo, de 15 minutos (como en la mayoría de las metodologías de conteo actuales). El procedimiento para la definición específica de los períodos tanto en tramificación como magnitud, para poder capturar aquellos con flujos crecientes o decrecientes, es algo que queda fuera del alcance de este trabajo (no siendo excluyente la metodología aquí presentada con este procedimiento de definición de períodos).

A continuación, se detalla paso a paso el proceso de calibración de tiempos de viaje:

Paso 1: Ingreso de los flujos obtenidos mediante conteos en terreno, para cada período, al modelo de microsimulación.

Paso 2: Si hay transporte público, corrección del flujo de buses, utilizando para ello las frecuencias establecidas en los programas de operación de la agencia correspondiente.

Paso 3: Realizar corridas del modelo y a partir de ello obtener indicadores de velocidad.

Paso 4: Revisar las velocidades obtenidas para cada período definido y por cada tramo de la red (de acuerdo a como se hayan definido en la modelación estos tramos) y mediante éstas, estimar tiempos de viaje. Para todos los períodos, en todos los tramos el promedio del tiempo de viaje modelado debe estar dentro del 15% del promedio del tiempo de viaje observado (NSW, 2013).

Si el criterio anterior se cumple para todos los tramos en todos los períodos, terminar las iteraciones. Si para algún tramo no se cumple el criterio, pasar al Paso 5.

Paso 5: Para cada tramo (dentro de un período) en el cual no se cumpla el criterio del Paso 4, aumentar los flujos de demanda ingresados al programa, uno a uno. Para un primer ajuste, se recomienda aumentar los flujos hasta el valor de saturación de la sección. Si el flujo actual asignado a una sección ya corresponde al de saturación, o si no es la primera vez que se aumenta el flujo de dicha sección, realizar incrementos, por ejemplo de 10%, respecto al flujo utilizado anteriormente.

Paso 6: Ingreso de las demandas estimadas al modelo, y volver al Paso 3.

Las iteraciones se pueden realizar todas las veces que sea necesario, hasta que se considere que los tiempos de viaje (velocidades) replican de manera correcta la realidad.

#### **4.2.3.- Revisión de colas y comportamiento general del modelo**

Luego de calibrados los flujos de saturación, ajustados los conteos y determinada la demanda que mejor replique los tiempos de viaje observados, se revisa el indicador de desempeño de las colas replicadas en el modelo, según el indicador de la Ecuación 2. Para ello es importante que el proceso de registro de las colas en terreno sea preciso, puesto que el indicador de ajuste se construye en base a este valor.

Al ajustar los conteos y replicar las velocidades observadas modificando los flujos que entran a la red, se emulan los estados de tráfico presentes en la realidad. Es decir, se apunta a un trío de valores factibles para  $v$ ,  $q$  y  $k$  según un diagrama fundamental del tráfico, ejemplificado en la Figura 2. Por esta razón, las colas debiesen estar dentro del rango de lo observado. Sin embargo, de haber grandes diferencias entre las colas simuladas y observadas, se pueden calibrar parámetros que definen el comportamiento vehicular, como los tiempos de reacción de los vehículos en movimiento y en reposo, entre otros.

Finalmente, es necesario realizar una calibración visual del modelo (Zúñiga, 2010), para verificar un correcto comportamiento de los vehículos en la red. De esta manera, es posible detectar y corregir comportamientos anómalos como bloqueos inexistentes, fases de semáforo mal codificadas que provoquen falsos cuellos de botella, tiempos de detención de buses en paraderos, mal uso de pistas u otras situaciones que no se condigan con lo observado en terreno.

## **5.- APLICACIÓN: CASO DE ESTUDIO**

Las principales aplicaciones de la metodología de ajuste son (i) replicar la situación base de manera más precisa a lo que se hace actualmente, y (ii) evaluar la capacidad de cuellos de botella. A continuación, se hace una breve descripción y se expone un ejemplo de utilización para el caso (i). El caso (ii) involucra situaciones donde la capacidad en la línea de parada no es constante por presencia de bloqueos producidos por colas provenientes de aguas abajo, lo que no es abordado en este trabajo.

El caso estudiado corresponde a Gran Avenida con Vicuña Mackenna y Los Morros, en la comuna de La Cisterna en Santiago de Chile. A continuación se explica el proceso de recopilación de información para el estudio, y luego se comparan los resultados del modelo donde se utilizaron directamente los flujos medidos en terreno (en condiciones congestionadas) con los obtenidos al aplicar la metodología de ajuste de conteos.

### **5.1.- Metodología de recopilación de información**

En Santiago, todos los buses de la flota de transporte público (Transantiago) están equipados con dispositivos GPS que envían la posición y velocidad instantánea de los buses cada 30 segundos. Esta información es procesada y agregada siguiendo a Cortés et al. (2011) para determinar la velocidad promedio por media hora a la cual se desplazan los buses en determinada ruta, tramificada cada 250 metros. El costo de acceder a esta información es prácticamente nulo, ya que se obtiene a partir de los datos del sistema. Además, el sector en particular tiene flujos significativos de buses, lo que permite tener una aproximación robusta de la velocidad.

Para este estudio, la variable principal de calibración fue el tiempo de viaje de los buses en cada sección, registrado mediante las emisiones GPS de velocidad de los buses. Estos tiempos de viaje ya incorporan la detención de los buses en los paraderos y otras posibles demoras asociadas a la operación del transporte público, por lo que no es necesario realizar ajustes adicionales si se incorpora la operación de los paraderos en la microsimulación. La velocidad de los automóviles es mayor a la de los buses, ya que no tienen estas demoras propias de su operación.

De todas formas, en condiciones congestionadas de flujo mixto donde los buses circulan junto al resto de los vehículos, la velocidad determinada a partir de las emisiones GPS de los buses es también una aproximación de la velocidad del resto del flujo. Esta velocidad se podría utilizar para calibrar la velocidad del flujo mixto y es una opción análoga al “método del vehículo flotante”, que en una de sus variantes usa automóviles equipados con GPS para medir velocidades (UOCT, 2011).

Adicionalmente, se realizaron conteos en terreno para obtener mediciones de flujos iniciales a incluir en el modelo. Por otro lado, las mediciones de los largos de cola también se obtuvieron a partir de observaciones en terreno. Esos datos se obtuvieron para el tramo horario de 7 a 9 a. m.

## 5.2.- Comparación de resultados obtenidos

La Figura 3 muestra un esquema del cruce de Gran Avenida con Vicuña Mackenna y Los Morros. En particular, el enfoque está en el acceso de Gran Avenida sentido Sur–Norte, correspondiente al tramo Lo Espejo – Vicuña Mackenna (arco azul), el cual llega a la intersección con tres pistas.

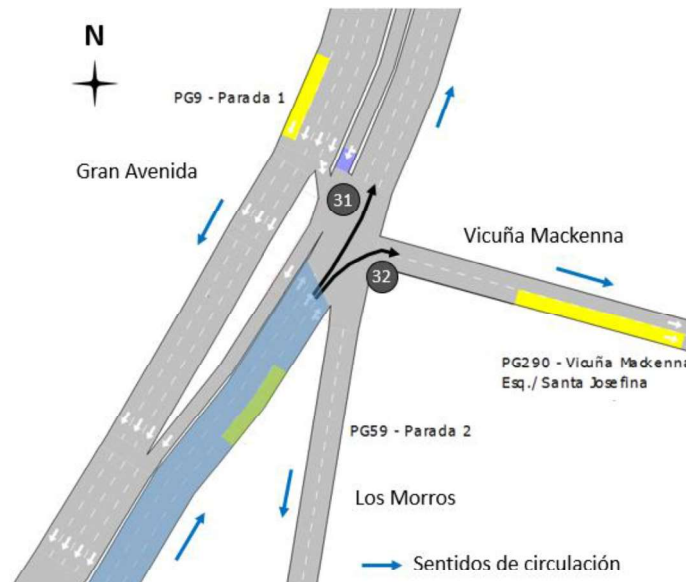


Figura 3: Gran Avenida con Vicuña Mackenna y Los Morros, La Cisterna.

Los movimientos observados corresponden a los puntos 31 y 32, mostrados en la Figura 3. La composición del flujo vehicular, obtenida de conteos realizados en los puntos mencionados, se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición del flujo vehicular

Hora	Autos	Taxis	Taxis colectivos	Buses urbanos	Buses interurbanos	Camiones	Motos	Total
7 a 8 a.m.	1.448	147	103	219	27	30	68	2.042
8 a 9 a.m.	1.178	168	90	227	29	62	43	1.797

Este acceso presenta congestión y colas de aproximadamente 350 metros. Los tiempos de viaje obtenidos a partir de los GPS de buses para este tramo de Gran Avenida, en el horario estudiado, son de 2,2 minutos (de 7 a 8 a. m.) y 2,5 minutos (de 8 a 9 a.m.).

Los flujos obtenidos en terreno fueron ingresados directamente al modelo. Luego, se corrigió el flujo de buses de transporte público utilizando las frecuencias establecidas por el plan operacional vigente. Este último valor corresponde a 304 buses/h, entre 7 y 9 a.m., siendo un 34% y un 39% superior al registrado vía conteos.

Con estos datos, se realizaron corridas del modelo. La Tabla 3 y 4 muestran la diferencia entre los indicadores obtenidos utilizando flujos medidos en terreno y los ajustados mediante la metodología, separados por hora de operación (de 7 a 8 a. m. y de 8 a 9 a. m.).

Tabla 3: Comparación de indicadores de acuerdo a flujos utilizados (7 a 8 a. m.).

Variable	Real	Modelado		Ajuste (real v/s modelado)	
	Registrado en terreno (GPS)	Usando conteos	Usando flujos ajustados	Usando conteos (%)	Usando flujos ajustados (%)
Tiempo de viaje (s)	132	97,2	131,7	-26,4	-0,2
Cola Máxima (m)	350	150	420	-57,1	20,0
Flujo ingresado al modelo (veh/h)	-	2.127	2.325	-	-
Tiempo de demora (s)	-	68,9	103,6	-	-

Tabla 4: Comparación de indicadores de acuerdo a flujos utilizados (8 a 9 a. m.).

Variable	Real	Modelado		Ajuste (real v/s modelado)	
	Registrado en terreno (GPS)	Usando conteos	Usando flujos ajustados	Usando conteos (%)	Usando flujos ajustados (%)
Tiempo de viaje (s)	150	78,8	149,3	-47,5	-0,5
Cola Máxima (m)	370	95	430	-74,3	16,2
Flujo ingresado al modelo (veh/h)	-	1831	2.005	-	-
Tiempo de demora (s)	-	50,3	120,8	-	-

De la Tabla 3 y 4 es posible observar las diferencias importantes entre los valores obtenidos dependiendo de los flujos que se utilicen. En cuanto al tiempo de viaje, la metodología de ajuste de conteos busca igualar ese valor por construcción, lo que se refleja en la tabla.

En ambos períodos horarios se obtuvieron resultados considerablemente más cercanos a lo observado en la realidad al aumentar los flujos ingresados al modelo respecto a los medidos utilizando conteos. En el primero de los períodos, de 7 a 8 a.m., el flujo ingresado es superior a la capacidad teórica de la intersección, que es 2250 veh/h (considerando 3 pistas) con un flujo de saturación por pista de 1800 veh/h y un 42% de reparto en el semáforo, mientras que en el segundo es inferior.

A partir de los tiempos de viaje y largos de cola obtenidos, el modelo evidencia que los conteos no están midiendo la demanda total, si no que la descarga en la línea de parada, teniendo como precedente que existen colas remanentes. El flujo registrado por conteos, de 2042 veh/h, correspondiente a la suma de los movimientos 31 y 32 de la Figura 3 (antes de corregir por el transporte público), es incluso inferior a la capacidad teórica del acceso estudiado. Esto se puede explicar, entre otras razones, por (i) un flujo de saturación real menor al estimado teóricamente o (ii) errores en las mediciones. Respecto a (i), notar que los 304 buses/h por el acceso estudiado

corresponden a una de las mayores frecuencias de buses por un eje en toda la ciudad de Santiago, lo que puede contribuir a flujos de saturación más bajos. Cualquiera sea el caso, al utilizar directamente los conteos de terreno, el modelo no representa de forma correcta los tiempos de viaje ni lo observado en terreno.

Notar que en el segundo período, de 8 a 9 a.m., el flujo ajustado es de 2005 veh/h, inferior a la capacidad teórica del acceso. Ahora bien, como ya se mencionó, la capacidad teórica puede ser inferior debido al alto número de buses. Por otro lado, en el primer período considerado ya se forma cola, por lo que en el segundo ya existen condiciones congestionadas previamente, no necesitando ingresar flujos altos para mantener las condiciones congestionadas.

## **6.- CONCLUSIONES**

Los modelos que se utilizan para evaluar proyectos viales deben representar adecuadamente los tiempos de viaje, las velocidades y la extensión de colas observadas en la realidad para apoyar de mejor manera la toma de decisiones. La metodología propuesta en este trabajo tiene como objetivo ajustar los flujos vehiculares obtenidos a partir de conteos para replicar las condiciones operativas que se observan en la realidad. Este ajuste es necesario para redes congestionadas donde los conteos representan la capacidad de las intersecciones y no la demanda real, lo que altera los resultados de los modelos y subestima los potenciales beneficios de los proyectos evaluados.

Si bien la metodología propuesta en este trabajo no asegura obtener el perfil de demanda real, sí permite una aproximación de ésta mediante un aumento de los flujos vehiculares para replicar los tiempos de viaje y emular los estados de tráfico observados. Existen otros métodos presentados en este estudio para determinar la demanda real en ciertos casos, pero existen complicaciones operativas o restricción de recursos que impiden realizar todas las mediciones requeridas apropiadamente.

La metodología propuesta utiliza como variable principal de calibración la velocidad y/o tiempos de viaje en rutas o tramos seleccionados, y como variable secundaria el largo de las colas. Para que la metodología sea válida, debe cumplirse que existan condiciones congestionadas, que la intersección o grupo de intersecciones estén semaforizadas, y que no existan bloqueos de la descarga en la línea de parada. Se ejemplifica esto con un caso de estudio, en el que se comparan los resultados del modelo donde se utilizaron directamente los flujos medidos en terreno (en condiciones congestionadas) con los obtenidos al aplicar la metodología de ajuste de conteos. Los resultados indican un mejor ajuste al aumentar los flujos ingresados al modelo respecto a los medidos utilizando conteos, logrando corregir diferencias de hasta un 47% en los tiempos de viaje registrados.

Para complementar la metodología, como trabajo futuro se puede explorar la factibilidad de aplicación en intersecciones prioritarias (sin semáforo), y también investigar qué sucede si la capacidad en la línea de parada no se mantiene constante, en el caso de bloqueos aguas abajo. En cuanto a los períodos en los cuales se divide el análisis de las intersecciones para determinar y ajustar los tiempos de viaje, la metodología se beneficiaría de un procedimiento para elegir la tramificación y magnitud de dichos períodos.

## REFERENCIAS

AUSTROADS (2006). **The Use and Application of Microsimulation Traffic Models**, Sección 3, Department of Transport and Main Roads, Australia.

Bucknell, C., Schmidt, A., Cruz, D. y Muñoz, J. C. (2017) Identifying and Visualizing Congestion Bottlenecks with Automated Vehicle Location Systems: An Application In Transantiago. **96th TRB Annual Meeting**. 8 -12 Enero 2017, Washington, Paper 17-04537.

Cortés, C., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M. & Zúñiga, M. (2011) **Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data**. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 19, No. 4, 695-707. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2010.12.008>

Daganzo, C. F. (1997) **Fundamentals of transportation and traffic operations**. 1<sup>era</sup> Ed. Pergamon, Oxford.

FHWA (2004) **Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modelling Software**, Traffic Analysis Toolbox Volume III, Sección 5, U.S. Department of Transportation, Estados Unidos.

NSW (2013) **Traffic Modelling Guidelines**, Sección 11.5.2, Transport Road & Maritime Services, Australia.

UOCT (2011) **Manual programación y modelación de semáforos**, Sección 3.2.3, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile.

Zito, C., Tat, L. y Tamhane, A. (2011) What are we counting? Getting inputs correct to improve modelling outcomes. **XXXIV Australasian Transport Research Forum Proceedings**. 28 – 30 Septiembre 2011, Adelaide.

Zúñiga, V. (2010) **Uso de Herramientas de Microsimulación para la Definición de Estrategias de Control de Tránsito para la Ciudad de Santiago**. Memoria de título, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.