

# Calibración del Microsimulador de Tráfico TSIS-CORSIM en Chile

Rodrigo Fernández A. y María Francisca Lecaros D.  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes  
Av. San Carlos de Apoquindo 2200, Las Condes, Santiago  
rfa@uandes.cl

Alejandra Valencia V.  
Escuela de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
Av. Brasil 2147, Valparaíso, Chile.  
alejandra.valencia@ucv.cl

## RESUMEN

El modelo TSIS –que incluye al microsimulador de tráfico CORSIM de la Federal Highway Administration de EEUU (FHWA)– ha sido utilizado por el Grupo de Estudios de Transporte (*get*) de la Universidad de los Andes para realizar experimentos de simulación sobre prioridades al transporte público. No obstante, el modelo ha sido utilizado con fines académicos, sin haber sido contrastado con las condiciones de tráfico chilenas. El objetivo de este trabajo es mostrar un ejercicio de calibración de TSIS en una arteria urbana de Santiago y observar sus resultados para ser utilizado en el estudio de medidas de gestión de tránsito en Chile.

**Palabras claves:** microsimulación de tráfico, TSIS-CORSIM, calibración.

## ABSTRACT

The TSIS model –which includes the well-known traffic microsimulator CORSIM of the U. S. Federal Highway Administration (FHWA)– has been used by the Transport Studies Group (*get* in Spanish) of Universidad de los Andes for simulation experiments on public transport priorities. However, the model has been used for academic purposes, without being contrasted with the Chilean traffic conditions. The aim of this paper is to show a calibration exercise in an urban road in Santiago and observe its results to be used in the study of traffic management schemes in Chile.

**Keywords:** traffic microsimulation, TSIS-CORSIM, calibration

## 1. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

La Teoría del Seguimiento Vehicular (Car Following Theory) es la base de todos los microsimuladores de tráfico. Tiene varios precursores en la década de 1950, pero su formalización se consolida con el trabajo de Herman *et al* (1958) en los laboratorios de General Motors. Consiste en una descripción de cómo se comporta un vehículo al ir tras otro. El objetivo es que mediante esta descripción se pueda extrapolar el comportamiento a toda una cola de vehículos en una pista. Posteriores desarrollos (Gipps, 1986) levantan esta restricción y describen el adelantamiento entre vehículos. En la figura se muestra el sistema bajo análisis encerrado por una línea punteada (Fernández, 2009).

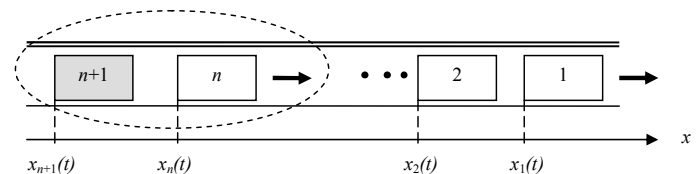


Figura 1: Sistema de Análisis de la Teoría del Seguimiento Vehicular

El modelo describe el comportamiento del vehículo  $n+1$  (sucesor) en función de lo que haga el vehículo  $n$  (predecesor) mediante las variables  $x_n(t)$ ,  $\dot{x}_n(t)$  y  $\ddot{x}_n(t)$ , que son respectivamente la posición, velocidad y aceleración de un vehículo  $n$  en el instante  $t$ . Se asume que el conductor del vehículo sucesor variará su respuesta en forma proporcional al estímulo que recibe, ponderado por su sensibilidad. Esto se puede escribir como:

$$\text{Respuesta}_{\text{sucesor}} = \text{Sensibilidad}_{\text{sucesor}} * \text{Estímulo}_{\text{predecesor}} \quad (1)$$

En un sistema cerrado como el descrito, el estímulo lo proporcionará el vehículo predecesor al reducir o aumentar la velocidad relativa a la del sucesor. La respuesta del sucesor podrían ser tres: mantener su velocidad (v.g., si el predecesor está alejado), reducir su velocidad o aumentarla. Naturalmente, la respuesta no será inmediata, sino que tendrá una tardanza  $T$ . De acuerdo con lo anterior, la formulación matemática del supuesto de comportamiento de la Ecuación (1) es la siguiente.

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = S[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (2)$$

Donde  $S$  es el valor de la sensibilidad de los conductores [ $s^{-1}$ ] y  $T$  es el tiempo percepción-reacción de los mismos [ $s$ ].

El tiempo percepción-reacción  $T$  es un lapso que involucra una siguiente serie de acciones, cada una de las cuales agrega una demora a la respuesta de un conductor frente a un estímulo:

percibir el estímulo, interpretar el estímulo, evaluar la mejor respuesta, ejecutar la respuesta decidida, y por último la transmisión mecánica de la respuesta. Como existen diferentes conductores, no hay un único tiempo  $T$ , sino una distribución de ellos. Tal distribución sigue una tendencia Lognormal, como la mostrada en la figura siguiente (Koppa, 2001). De la figura se puede observar que la moda de la distribución es de alrededor de un segundo. Sin embargo, a un 10% de los conductores les tomará más de dos segundos reaccionar; nótese además, sólo un 5% puede hacerlo en un lapso del medio segundo que se exige en las pruebas para obtener licencia de conducir en Chile. El tiempo de percepción-reacción  $T$  es clave al momento de calibrar un modelo de microsimulación de tráfico, como se verá más adelante.

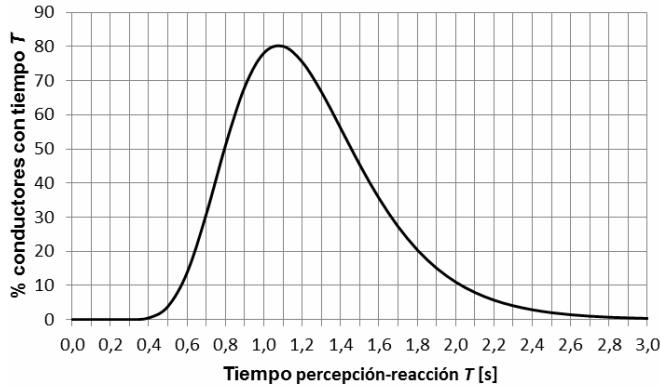


Figura 2: Distribución del Tiempo Percepción-Reacción (Koppa, 2001)

En resumen, la teoría del seguimiento vehicular da origen a una familia de modelos de la siguiente forma:

$$\underbrace{\ddot{x}_{n+1}(t+T)}_{\text{Re respuesta}} = \frac{\lambda_{m,l} [\dot{x}_{n+1}(t)]^m}{\underbrace{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l}_{\text{Sensibilidad}}} \underbrace{[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]}_{\text{Estímulo}} \quad (3)$$

Los exponentes  $m$  y  $l$  toman distintos valores según las hipótesis que han hecho varios autores sobre la sensibilidad de los conductores. Éstas se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 1: Resumen de Parámetros de Sensibilidad de Conductores

Hipótesis sensibilidad	$m$	$l$
Herman	0	0
Greenberg	0	1
Greenshields	0	2
Underwood	1	2
May and Keller	0,6-0,8	2,1-2,8

Los parámetros de May and Keller (1967) fueron empíricamente obtenidos en viaductos y túneles. Su cota inferior de se aproxima bastante a la hipótesis de Greenshields, que indica que la sensibilidad de los conductores es inversamente proporcional al cuadrado del espaciamiento entre los vehículos. De aquí deriva la ecuación fundamental del tráfico  $q = kv\bar{v}_s$ , en que  $q$  [veh/h] es el flujo promedio en una sección de vía,  $k$  [veh/km] la concentración o densidad promedio en el tramo y  $\bar{v}_s$  [km/h] es la velocidad media espacial de los vehículos. Se enlaza, de este modo, la microsimulación de tráfico con las variables de estado promedio con que se acostumbra a describir las condiciones de tráfico desde una perspectiva macroscópica.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TSIS

Se ha escogido trabajar con el microsimulador de tráfico TSIS para representar una red vial con tráfico mixto porque, de todos los analizados, es el que ha resultado más fácil de aprender a manejar por los usuarios y es de bajo costo (cada licencia académica individual cuesta US\$ 500 y una para 10 puestos de trabajo en laboratorio US\$ 750). Existen, no obstante, otros modelos disponibles en el ámbito nacional, entre los que se encuentran AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulation for Urban and No-Urban Network), PARAMICS (PARALLEL MICROSIMULATION) y VISSIM (Verkehr in Städten-Simulation), cada uno con sus ventajas y limitaciones (ver Burgos, 2004).

TSIS (Traffic Software Integrated System) es un software que utiliza un microsimulador de tráfico llamado CORSIM, enfocado a modelar redes viales urbanas y carreteras (FHWA, 2006). CORSIM (CORridor SIMulation) está compuesto por dos modelos: NETSIM (NETwork SIMulation), que modela las redes viales urbanas, y FRESIM (FREeway SIMulation), que modela caminos y autopistas. Cuenta con un editor gráfico para la entrada de datos físicos y operacionales de la red llamado TRAFED (Figura 3). Una vez ejecutado el programa, un módulo de animación gráfica llamado TRAFVU (TRAFFIC Visualization Utility) permite ver una animación de los vehículos sobre la red. En la Figura 4 se muestra la pantalla de TRAFVU donde se puede ver semáforos, señales de prioridad, paraderos (rectángulos azules) y vehículos.

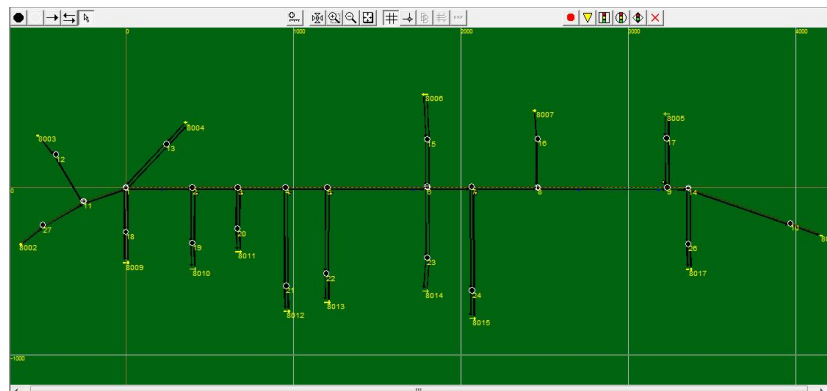


Figura 3: Editor TRAFED mostrando Red Av. Las Condes entre La Oración y Hospital Fach

En TSIS la red vial se compone de nodos y arcos que son dibujados por el usuario en TRAFED. Los nodos representan las intersecciones que pueden ser semaforizadas, con señal de prioridad o sin regulación. En los nodos semaforizados se debe indicar los movimientos y los tiempos de rojo, amarillo y verde para cada fase.

En cada nodo se detalla el número de vehículos que viran a la derecha, izquierda y que siguen derecho mediante un porcentaje del flujo total que accede al nodo. La asignación de vehículos a la red se hace mediante los nodos de entrada (mostrados en amarillo en la Figura 3), especificándose ya sea el flujo horario que entra a la red o el total de vehículos que ingresa durante el tiempo de simulación.



Figura 4: Módulo TRAFVU mostrando Simulación de Av. Las Condes Dirección Oriente

Los arcos representan las vías que unen los distintos nodos para formar la red. Éstos pueden tener una o más pistas y a cada pista se le puede asignar una función exclusiva; por ejemplo, pista sólo bus, pista de viraje a la izquierda o derecha, pista de automóviles con alta ocupación.

En TSIS existe la opción de modelar buses y paraderos, los que se encuentran ubicados en los arcos y se definen por un número de identificación, su distancia respecto al nodo aguas

abajo, el número de sitios del área de parada, si el paradero bloquea o no al resto del tráfico (i.e., si está o no en bahía), el intervalo promedio entre buses, el tiempo promedio de detención, la distribución de este tiempo promedio, y el porcentaje de buses que no se detienen en el paradero. TSIS entrega archivos de resultados promedio ya sea para el transporte público, como para el resto del tráfico (Figura 5 y 6).

ROUTE STATISTICS					
ruta de buses	viajes de buses por ruta	tiempo total de viaje	tiempo de viaje promedio	n° total de viajes de personas	tiempo de viaje de todas las personas
ROUTE	BUS TRIPS	TOTAL TRAVEL TIME (BUS-MIN.)	MEAN TRAVEL TIME (SEC/BUS)	PERSON TRIPS	PERSON TRAVEL TIME (MINUTES)
1	22	108.6	283.6	550	2715.0

THESE ESTIMATES ASSUME AN AVERAGE BUS OCCUPANCY OF 25.0 PASSENGERS PER BUS THROUGHOUT THE NETWORK

NETWORK-WIDE AVERAGE STATISTICS			
velocidad media	demora total autos	tiempo viaje entre arcos	
TOTAL VEHICLE-MILE = 708.46	VEHICLE-HOURS OF: MOVE TIME = 23.62, DELAY TIME = 20.47, TOTAL TIME = 44.09	MINUTES/MILE OF: DELAY TIME = 1.73, TOTAL TIME = 3.73	

Figura 5: Ejemplo de Resultados Globales entregados por TSIS

NETSIM BUS STATISTICS								
Nodos	viajes por ruta	pax que viajan por arco	tiempo de viaje total	tiempo en mov. solamente	demora por arco	moving/travel	vel.	n° de detenciones en cada arco
LINK	BUS TRIPS	PERSON TRIPS	TRAVEL TIME (MINUTES)	MOVING TIME (MINUTES)	DELAY TIME (MINUTES)	M/T	SPEED (MPH)	NUMBER OF STOPS
( 5, 4)	23	575	6.2	4.8	1.4	0.77	23.0	0
( 7, 5)	23	575	20.4	7.0	13.4	0.34	10.3	22
( 4, 3)	23	575	37.7	18.1	19.7	0.48	14.4	13
(8003, 7)	23	575						
( 2, 1)	22	550	6.0	4.8	1.2	0.80	23.9	0
( 3, 2)	23	575	38.0	8.4	29.6	0.22	6.6	17

Figura 6: Ejemplo de Resultados de TSIS para los Arcos con Buses

CUMULATIVE NETSIM STATISTICS AT TIME 18:30: 0

ELAPSED TIME IS 0:30: 0 ( 1800 SECONDS), TIME PERIOD 1 ELAPSED TIME IS 1800 SECONDS

Arcos LINK	millas por arco VEHICLE MILES TRIPS	demora total veh-min			tiempo de viaje por arco		demora promedio veh-s/veh				promedio detenciones det=veh*det(%)*vol(vph)				
		MOVE TIME	DELAY TIME	TOTAL TIME	MINUTES/MILE TOTAL TIME	DELAY TIME	SECONDS / VEHICLE TOTAL TIME	DELAY CONTROL	QUEUE DELAY	STOP* TIME	STOPS (%)	VOL MPH			
( 5, 4)	64.91 622	129.8	107.3	237.1	0.55	3.65	1.65	22.8	10.3	8.8	7.6	7.2	39	1244	16.4
( 12, 4)	3.50 132	7.0	52.9	59.9	0.12	17.10	15.10	27.1	23.9	23.0	22.6	22.2	66	264	3.5
( 5, 6)	3.16 117	6.3	2.3	8.7	0.73	2.74	0.74	4.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0	234	21.9
( 7, 5)	112.24 738	224.5	45.6	270.1	0.83	2.41	0.41	21.9	3.7	2.2	1.4	2.2	4	1476	24.9
(8008, 10)	199													398	
( 10, 3)	6.11 198	12.2	80.7	92.9	0.13	15.21	13.21	28.1	24.4	23.7	22.8	22.3	60	396	3.9
( 13, 4)	6.40 200	12.8	87.6	100.4	0.13	15.68	13.68	29.9	26.1	24.6	23.4	22.9	69	400	3.8
(8002, 8)	329													658	
(8006, 9)	347													694	
( 4, 3)	249.05 635	498.1	302.8	800.9	0.62	3.22	1.22	75.0	28.8	20.4	17.2	17.5	53	1270	18.7
( 4, 12)	3.74 141	7.5	2.7	10.2	0.73	2.73	0.73	4.3	1.2	0.0	0.0	0.0	0	282	22.0
( 8, 2)	10.53 327	21.1	116.5	137.6	0.15	13.07	11.07	25.1	21.3	20.4	19.5	18.8	55	654	4.6
(8003, 7)	742													1484	
( 2, 13)	80.88 744	161.8	29.2	190.9	0.85	2.36	0.36	15.3	2.3	0.0	0.0	0.0	0	1488	25.4
( 3, 2)	130.54 715	261.1	260.8	521.9	0.50	4.00	2.00	43.4	21.7	14.9	13.4	14.7	33	1430	15.0
( 2, 9)	8.82 328	17.6	4.5	22.1	0.80	2.51	0.51	4.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0	656	23.9
( 9, 2)	9.28 345	18.6	125.5	144.0	0.13	15.52	13.52	24.9	21.7	20.5	20.0	19.4	58	690	3.9
( 3, 11)	3.98 128	8.0	2.2	10.1	0.78	2.55	0.55	4.8	1.0	0.0	0.1	0.0	0	256	23.5
( 4, 13)	5.36 170	10.7	3.9	14.6	0.73	2.73	0.73	5.2	1.4	0.0	0.1	0.0	0	340	22.0
( 2, 8)	9.95 309	19.9	3.8	23.7	0.84	2.39	0.39	4.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0	618	25.2
(8005, 12)	131													262	
(8010, 13)	197													394	
OSUBNETWORK=	708.46 1937	23.62	20.47	44.09	0.54	3.73	1.73	1.33	0.62	0.48	0.44	0.44	81.8		16.1

Figura 7: Ejemplo de Resultados de TSIS para Arco de Tráfico General

Además, para cada arco indica la cantidad de vehículos-distancia, el tiempo de viaje, las componentes de la demora total, las componentes de la demora promedio por vehículo, el tiempo detenido, el promedio de tenciones y la velocidad promedio (Figura 7).

### 3. PROCESO DE CALIBRACIÓN DE TSIS

#### 3.1 Aspectos Generales

En todo proceso de calibración de un modelo se pretende un ajuste lo más cercano posible entre éste y la realidad. Hollander and Liu (2008) mencionan las siguientes etapas para este objetivo.

Primero, definir las variables de contraste según el tipo de estudio que se esté realizando. Por ejemplo, en un estudio de tráfico en autopistas las variables de interés pueden ser el flujo, la velocidad, mientras que en un estudio para tráfico interrumpido las variables de interés pueden ser el flujo por arco, en caso de estar utilizando matrices origen-destino y los largos de cola en los semáforos. Segundo, determinar el indicador de ajuste que permita cuantificar las diferencias entre las salidas del microsimulador y los datos observados en terreno. Cuando este indicador llegue a un nivel aceptable (alrededor del 10%) se considerará que el modelo está calibrado. Tercero, elegir los parámetros de calibración teniendo en cuenta que se puedan obtener fácilmente en terreno y que tengan incidencia en los resultados del modelo. Cuarto, calibrar el modelo utilizando diversas metodologías, ya sea ensayo y error, en que se prueban diversos valores de los parámetros hasta que el indicador de ajuste entregue un valor satisfactorio. Esta metodología es muy conveniente cuando se calibra un número reducido de parámetros. También se pueden usar técnicas automáticas que plantean el problema como uno de optimización en el que se debe encontrar

el mejor conjunto de parámetros tal que se reproduzca la realidad con la precisión deseada; ejemplos son los algoritmos genéticos o la programación lineal.

Finalmente, una vez realizada la calibración, se deben validar sus resultados probándolos en un escenario distinto al anterior. El proceso de validación no debe ser ni más ni menos riguroso que el proceso de calibración, esto quiere decir que en el nuevo escenario se deben ingresar los mismos datos que se ingresaron para la calibración y que se deben utilizar las mismas variables de contraste definidas en el primer paso del proceso.

#### 3.2 Red de Calibración

Para elegir la red de este estudio se tuvieron en cuenta las recomendaciones de Espinoza y Coeymans (2008), a saber: pendiente nula o despreciable de las calles, que haya cierto grado de saturación de manera que se puedan analizar las colas, que las calles laterales aporten poco flujo, que haya ausencia de peatones que dificulten los virajes de los vehículos, que haya una proporción de buses en la red de modo de apreciar su efecto sobre el tráfico; en la actual condición de Transantiago se consideró en este estudio un porcentaje de 5% de buses en la red.

Teniendo en cuenta estas recomendaciones se eligió como red de calibración un tramo de 1,3 km de Avenida Las Condes entre calle La Oración y calle Hospital Fach (Figura 8) en el periodo comprendido entre las 7:30 y 9:00 de la mañana. La red cuenta con once intersecciones, cinco semaforizadas y cuatro paraderos. Una ventaja que presenta la red era poder ser utilizada para la calibración en la dirección oriente y para la validación en la dirección poniente. Sin embargo, debido a imponderables, en este trabajo sólo se presenta el ejercicio de calibración, dejando para un futuro estudio la validación.

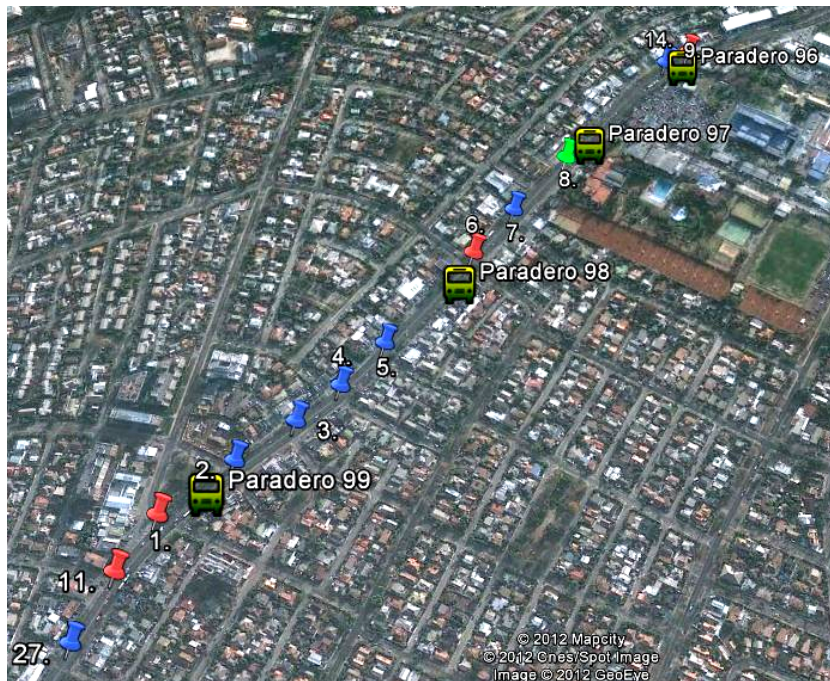


Figura 8: Red de Calibración en Dirección Oriente

En la figura se muestra en color azul las intersecciones reguladas por una señal de prioridad, en color rojo las intersecciones reguladas por semáforos de tiempo fijo y en verde un semáforo actuado por vehículos y peatones. También se muestran los paraderos codificados por su número de identificación. La numeración de las intersecciones y paraderos corresponde a la utilizada en el modelo para identificar los nodos y arcos de la red.

### 3.3 Obtención de Datos para Calibración

La primera medición realizada en la red fueron las variables geométricas y operacionales fijas. Ésta se hizo en forma manual y a través de Internet. Los datos que se recopilieron fueron la distancia de cada paradero a la intersección más cercana, el ancho de las pistas de la vía principal y de las vías secundarias, y el largo de los arcos. Este último dato fue obtenido a través de Google Earth. La información de la programación de los semáforos de la red fue facilitada por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT).

En segundo lugar se contó el flujo por tipo de vehículo en cada uno de los arcos de entrada. Esta medición se realizó en forma manual y para realizarla se necesitaron siete personas que midieron el flujo de dos movimientos por intersección. Debido a la extensión de la red escogida fue necesario dividirla en tres tramos para poder llevar a cabo las mediciones de flujo en tres días consecutivos. Todas las mediciones fueron realizadas los días martes, miércoles y jueves entre las 7:30 y 9:00 de la mañana, período escogido para la simulación. Con esta información se obtuvo el porcentaje de virajes en cada intersección.

En tercer lugar fue necesario medir el tiempo de detención de los buses en los paraderos y el porcentaje de buses que no se detiene en ellos. Esta medición es difícil de realizar directamente en terreno, ya que se producen paradas simultáneas en un mismo paradero. Por esto, se decidió realizarla a través de grabaciones de video. Se instalaron cámaras en cada paradero los mismos días en que se medía el flujo por arco.

En cuarto lugar se midió velocidades de flujo libre para cada arco de la red. Esta medición se realizó con la ayuda de una pistola radar los días sábado y domingo después de las 10:00 de la mañana, horario en el que se esperaba contar con bajo flujo vehicular de modo que los vehículos circulen a la velocidad deseada. Una vez calculados los promedios para cada arco de la red, se calcularon los promedios para cada tramo comprendido entre dos semáforos consecutivos.

Por último, se realizó una grabación en video en el período de la punta tarde del día viernes para medir el flujo de saturación de la intersección de Avenida Las Condes con Las Tranqueras. La medición se realizó mediante el método de histogramas (Fernández, 2009). De aquí se obtuvo el tiempo perdido al inicio del verde ( $\lambda_1$ ) y el intervalo promedio entre los vehículos que se descargan de la cola durante el verde efectivo ( $\beta$ ). Como en ninguna otra intersección de la red fue posible medir flujos de saturación, se extrapola esta información a todos los demás arcos del eje principal de la red. En los arcos de las vías secundarias se mantuvieron los valores por defecto del modelo  $\lambda_1 = 1,8$  segundos y  $\beta = 2,0$  segundos, puesto que la calibración se centró en la vía principal.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Definición de Indicadores

Como se indicó en la sección 3.1, el primer paso en el proceso de calibración es definir las variables de interés según el tipo de estudio. En este caso de tráfico interrumpido se consideró que la variable más relevante al momento de replicar el comportamiento de la red es la longitud máxima de cola, es decir, la longitud de cola al inicio del verde efectivo o final del rojo efectivo del semáforo.

En este trabajo se decidió utilizar dos indicadores de calibración. El primero de esos indicadores es el Indicador de Desempeño (*ID*) utilizado por Velasco y Coeymans (2008).



$$ID = \sum_i \frac{|Lq_{si} - Lq_{oi}|}{Lq_{oi}} \frac{Lq_{oi}}{Lq_{o_{red}}} \quad (4)$$

Donde  $Lq_{si}$  es la longitud de cola máxima obtenida de la simulación para el arco  $i$ ,  $Lq_{oi}$  es la longitud de cola máxima observada en terreno en el arco  $i$ , y  $Lq_{o_{red}}$  es la máxima longitud de cola observada en toda la red. El término final hace que las colas de mayor magnitud sean más relevantes que las pequeñas.

El segundo indicador de calibración ajuste que utilizó fue el Error Absoluto Medio Normalizado (*MANE: Mean Absolute Normalized Error*). Este indicador utiliza el valor absoluto de la diferencia entre los datos observados y los simulados dándoles a todos los errores el mismo peso. Es uno de los indicadores que Hollander and Liu (2008) consideran en su estudio.

$$MANE = \frac{1}{N} \sum_i \frac{|x_i - y_i|}{y_i} \quad (5)$$

En este caso,  $x_i$  corresponde a las colas simuladas,  $y_i$  a las colas observadas y  $N$  al número de colas consideradas en la red. La ventaja que presenta este indicador con respecto al anterior es que es sensible a grandes errores, con lo cual puede ser más objetivo.

Ambos indicadores son bastante similares, pero las pequeñas diferencias que reportan son suficientes para que los resultados que entregan sean diferentes. Los dos calculan un error absoluto para cada acceso semaforizado, pero el primero lo multiplica por un ponderador para dar más peso a las colas mayores mientras que el segundo no lo hace. Además el *ID* es sólo una suma de los errores parciales obtenidos para cada intersección, mientras que el *MANE* calcula un promedio de ellos.

El criterio de parada es establecido por cada modelador, no existiendo un criterio universal que defina el error aceptable. Este depende de cada proyecto y del grado de importancia de cada una de las variables de interés. En casos en que hay más de una variable de interés, se puede establecer un criterio distinto para cada una de ellas de tal manera de ir avanzando en forma secuencial en la calibración. El criterio de parada más exigente será el de la última variable de interés calibrada puesto que con ella se considerará que el modelo en su globalidad está calibrado.

En este estudio se establecieron dos criterios de parada. El primero fue considerar un error máximo de un 10% entre las colas observadas y las simuladas. El segundo es detener el ajuste de los parámetros cuando se observe que no se reduce el error; este criterio es complementario con el primero.

#### 4.2 Definición de Parámetros de Calibración

TSIS-CORSIM es un programa muy abierto puesto que el usuario puede introducir más de 100 parámetros, pero significa que el modelador contará con más de 100 parámetros que puede modificar. El modelo define 10 tipos de conductores desde los más calmados hasta los más agresivos; a cada uno de ellos les asigna un comportamiento diferente.

TSIS posee distribuciones para diversos aspectos del tráfico vehicular basadas en estos 10 tipos de conductores; por ejemplo: distribución de los intervalos de descarga en las intersecciones semaforizadas, distribución de velocidades deseadas, distancia longitudinal aceptada para realizar un cambio de pista, la brecha crítica en intersecciones con señal de prioridad, etc.

Teniendo en cuenta que este estudio se realizó para las condiciones de tráfico interrumpido y que la variable de interés definida es la longitud máxima de cola, se escogió como parámetros potenciales de calibración el intervalo de descarga promedio ( $\beta$ ), su distribución según el tipo de conductor, la distribución de los tiempos de detención en paraderos, la distribución de la velocidad de flujo libre, la distribución de la brecha en una intersección con señal de prioridad y la distribución del tiempo para realizar un viraje a la izquierda con tráfico en contra. No todos estos parámetros tuvieron incidencia en los resultados del modelo, sin embargo, fueron considerados por la influencia que podían tener en una red de este tipo. Lecaros (2012) describe el efecto de cada uno de ellos.

Por lo expuesto en el Capítulo 1, interesa particularmente el intervalo de descarga promedio ( $\beta$ ), que es el intervalo mínimo entre vehículos que se descargan de una cola, en segundos. El intervalo de descarga promedio es el inverso del flujo de saturación ( $S$ ), que es la máxima tasa de descarga de una cola de vehículos durante el verde efectivo, medido en [veh/h]. Por lo tanto, midiendo el flujo de saturación en una intersección se obtiene intervalo de descarga promedio.

El intervalo de descarga promedio por defecto en TSIS es de 2,0 segundos. En la presente investigación se midió un intervalo de descarga promedio de 2,6 segundos, el que se asumió igual para todos los arcos de Av. Las Condes. Como información adicional, la pérdida inicial del verde resultó ser  $\lambda_1 = 1,7$  [s], muy similar al valor por defecto de 1,8 segundos.

#### 4.3 Resultados de la Calibración

Para realizar la calibración se procedió como recomiendan Hollander and Liu (2008) ajustando cada uno de los parámetros por separado de tal manera que se pueda apreciar el efecto que tiene cada uno sobre el valor por defecto. En Lecaros (2012) se encuentra este proceso en detalle.

Nos concentraremos en mostrar la calibración del intervalo de descarga promedio ( $\beta$ ). Para ello era necesario modificarlo en todos y cada uno de los arcos de la vía principal y volver a correr el modelo cada vez. Para cada prueba el modelo realizó entre 80 y 100 iteraciones, hasta que la red alcanzó el equilibrio. Se hicieron varias pruebas. En algunas ocasiones se subió el valor de  $\beta$  en todos los arcos y según el resultado obtenido se analizaba la opción de continuar aumentándolo o si era conveniente disminuirlo. A continuación, se muestran el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 2: Indicadores Rendimiento de la Calibración para el Parámetro  $\beta$ 

$\beta$ [s]	Arco	Nodo	Longitud cola máxima [veh]		ID: Indicador de Desempeño [%]		MANE [%]	
			Simulada	Medida	Arco	Red	Arco	Red
2,0	(27, 11)	La Oración	17	16	1,27		6,25	
	(11, 1)	Las Tranqueras	21	19	2,53		10,53	
	(5, 6)	V. Huidobro	13	6	8,86	24,05	116,67	37,61
	(9, 14)	Calle Fach	44	53	11,39		16,98	
2,2	(27, 11)	La Oración	17	16	1,27		6,25	
	(11, 1)	Las Tranqueras	21	19	2,53		10,53	
	(5, 6)	V. Huidobro	12	6	7,59	24,05	100,00	33,91
	(9, 14)	Calle Fach	43	53	12,66		18,87	
2,4	(27, 11)	La Oración	16	16	0,00		0,00	
	(11, 1)	Las Tranqueras	21	19	2,53		10,53	
	(5, 6)	V. Huidobro	14	6	10,13	20,25	133,33	38,80
	(9, 14)	Calle Fach	47	53	7,59		11,32	
2,6	(27, 11)	La Oración	18	16	2,53		12,50	
	(11, 1)	Las Tranqueras	22	19	3,80		15,79	
	(5, 6)	V. Huidobro	15	6	11,39	25,32	150,00	47,40
	(9, 14)	Calle Fach	47	53	7,59		11,32	
2,8	(27, 11)	La Oración	16	16	0,00		0,00	
	(11, 1)	Las Tranqueras	21	19	2,53		10,53	
	(5, 6)	V. Huidobro	13	6	8,86	22,78	116,67	36,04
	(9, 14)	Calle Fach	44	53	11,39		16,98	

#### 4.4 Análisis de Resultados

Primero, es necesario centrar la atención sobre los arcos (5, 6) y (9, 14). Ambos arcos son los que concentran en todos los casos los mayores errores parciales para ambos indicadores y, por lo tanto, se requiere de una explicación más detallada.

En el caso del arco (9, 14) la explicación de por qué las colas simuladas difieren de las observadas se debe a que la intersección aguas abajo es regulada por un semáforo actuado por vehículos y por peatones. Según Espinoza y Coeymans (2008) esta condición no es propicia para calibración.

Finalmente, la intersección se representó por un semáforo de tiempo fijo que reflejaría el comportamiento del semáforo como si éste fuera activado por vehículos o por peatones en todos los ciclos. De allí puede deberse la diferencia en los resultados.

Para el arco (5, 6) la diferencia entre la simulación y la observación es mayor. La explicación radica en la existencia de un paradero al llegar a la línea de detención, aspecto también indicado por Espinoza y Coeymans (2008) como desaconsejado a la hora de calibrar a través de longitudes de cola. En particular se observa que el modelo predice una subutilización de la primera pista al predecir que los automóviles se cambiarán de pista para no encontrarse con un bus detenido, aun cuando no haya ninguno en el paradero. Este fenómeno se aprecia en la Figura 9, justo al final del rojo efectivo del arco.

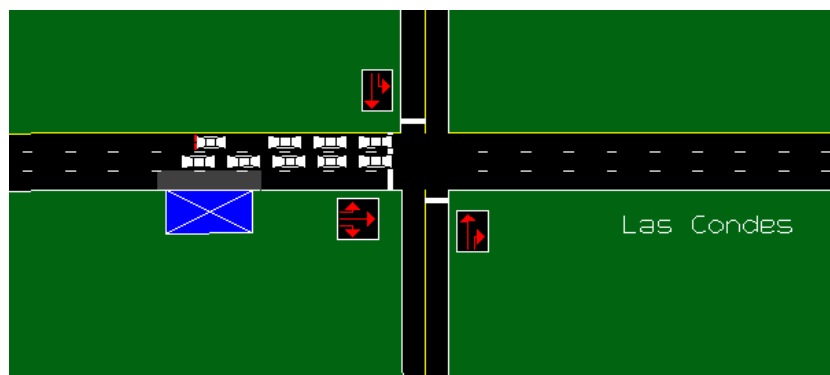


Figura 9: Modelación de la Subutilización de Primera Pista en Arco con Paradero

Respecto a los parámetros de calibración, se puede concluir que el único que realmente se puede considerar como relevante es el intervalo de descarga promedio ( $\beta$ ). Los demás parámetros mostraron una influencia menor en los datos de salida y en ningún caso se obtuvo una mejora de la situación por defecto. Asimismo, en el caso de las distribuciones de parámetros, ninguna de las pruebas logró mejorar la situación por defecto, por cuanto se concluye que lo mejor es mantener los valores que asigna TSIS a cada una de ellas.

En conclusión, se puede decir que, en el caso de este estudio, la calibración de TSIS se simplifica a ajustar el intervalo de descarga promedio de las colas en las intersecciones semaforizadas para ceñirse a las longitudes de cola observadas.

De la Tabla 2 se puede ver que el mejor valor de calibración para la red es  $\beta = 2,4$  [s], para el cual el ID mejora en un 16% con respecto a utilizar el valor por defecto  $\beta = 2,0$  [s].

En un análisis más detallado, si se elimina del cálculo de ID el arco (5, 6) con paradero, el ID de la red resulta igual a 10,1%, quedando en el límite que se asumió para que el modelo se considerase calibrado. Haciendo lo mismo en la situación por defecto ( $\beta = 2,0$  segundos), se produce una mejora del 33% en la predicción del modelo, ya que en este caso  $ID = 15,2\%$ . Si se hace el mismo ejercicio con el MANE, el resultado para la situación por defecto es  $MANE = 8,5\%$  versus  $MANE = 5,5\%$  en la situación calibrada, representando esta última una mejora del 35% con respecto al parámetro por defecto.

En conclusión, para ambos indicadores escogidos, la calibración del modelo logró una mejora superior a un tercio en su representación de la realidad.

## 5. CONCLUSIONES

La primera conclusión de este trabajo es que mediante un simple proceso de calibración por ensayo y error fue posible mejorar en más de un 33% la representación de la realidad con el modelo TSIS en el caso de una arteria de la ciudad de Santiago. Esta fue medida a través de la reproducción de la longitud máxima de cola en intersecciones semaforizadas. Con esto se logró el objetivo propuesto para este estudio.

En segundo lugar, se descubrió que en condiciones de tráfico ininterrumpido, es decir, en redes urbanas semaforizadas, el principal parámetro de calibración del modelo TSIS es el intervalo de descarga promedio de vehículos desde una cola durante el verde efectivo ( $\beta$ ). Según lo expuesto en el Capítulo 1 respecto del tiempo de percepción-reacción ( $T$ ), esta conclusión es esperable y coincide con lo encontrado por Espinoza y Coeymans (2008).

El mejor valor obtenido para la calibración es  $\beta = 2,4$  segundos. Por lo tanto, mientras otra investigación no diga lo contrario, se recomienda utilizar este valor para modelar con TSIS medidas de gestión de tránsito en redes de tráfico interrumpido en Santiago de Chile.

Se pudo concluir que otros parámetros tienen una influencia menor en los resultados del modelo y, dado que ninguno de ellos logró mejorar el valor de los indicadores de bondad de ajuste, se recomienda mantener los valores por defecto asignados por TSIS.

Igualmente, se sugiere centrar la atención en los parámetros de calibración que se ingresan directamente en los arcos, ya son los que tienen una mayor influencia en los resultados. No se recomienda intervenir en la gran cantidad de distribuciones que TSIS deja abiertas al usuario, sino que mantener su condición por defecto.

Si bien el modelo calibró a un nivel aceptable del 10%, esta calibración no ha sido validada aún. El presente trabajo sólo pretende mostrar el proceso de calibración, quedando para un segundo artículo el reporte de la validación en la dirección poniente de la red de Av. Las Condes. Asimismo, se continuará utilizando TSIS en otros escenarios, con diferentes condiciones de tráfico y transporte público, a fin de probar y reportar la validez de los resultados aquí obtenidos.

Finalmente, se ha mostrado que el microsimulador de tráfico TSIS-CORSIM permite representar apropiadamente una red vial con tráfico mixto, con ventajas respecto de su costo y curva de aprendizaje sobre los otros microsimuladores utilizados en Chile. Esto ya había sido mostrado tanto en los trabajos de Cofré, (2008) como en Fernández y Leay (2010).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un resultado parcial del Proyecto FONDECYT Regular 1120219, *Simulation research for traffic management guidelines of bus infrastructure in developing countries*. Los autores agradecen la ayuda brindada por los profesores Angelo Guevara y Sebastián Seriani de la Universidad de los Andes. También se reconoce la información entregada por la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT) de Santiago para el estudio.

## REFERENCIAS

- Burgos, V. (2004). Revisión de la incorporación del transporte público en modelos de microsimulación de tráfico. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Cofré, C.M. (2008). Evaluación del microsimulador de tráfico TSIS para gestión de tráfico en el medio nacional. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes, Santiago.
- Espinoza, C. y J.E. Coeymans (2008). Calibración de parámetros de transporte público en tráfico mixto para modelos micro: GETRAM en Santiago. XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte (CD-ROM). 14-17 Septiembre 2008, Cartagena de Indias, Paper T\_091.
- Fernández, R. y V. Leay (2010). Microsimulación y prioridad a buses en países en desarrollo. Estudio de casos en Santiago. XVI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (CD-ROM). 15-18 Julio 2010, Lisboa, Paper 01021.
- Fernández, R. (2009). Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular. 1ra Ed. Lom Ediciones, Santiago.
- FHWA (2006). TSIS User's Guide. Virginia.
- Gipps, P.G. (1986) A model for the structure of lane-changing decisions. Transportation Research B 20(5), 403-414.
- Herman, R., E.W. Montroll., R.B. Potts and R.W. Rothery (1958). Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following. Operations Research E. 17, 86-106.
- Hollander, Y. and R. Liu (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models. Transportation, 35(3), 347-362.
- Koppa, R.J. (2001). Traffic Flow Theory – A State-of-the-Art Report. Chapter 3, Human Factors. Transportation Research Board, Special Report 165, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Lecaros, M.F. (2012). Avances en la calibración de un microsimulador de tráfico para estudiar medidas de prioridad a buses. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes, Santiago.
- May, A.D. and H.E.M. Keller (1967). Non-Integer Car Following Models. Highway Research Record 199, 19-32.