

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS BÁSICOS VEHICULARES PARA FLUJO INTERRUPTIDO EN MODELOS DE SIMULACIÓN MICROSCÓPICA: GETRAM EN SANTIAGO

Luz María Velasco C. & Juan Enrique Coeymans A.
Pontificia Universidad Católica de Chile
Av. Vicuña Mackenna 4860
Macul, Santiago, Chile.
T: (+562) 686 4818 - 686 4270 / FAX (+562) 553 0281
Email: lvelasco@ing.puc.cl / jec@ing.puc.cl

RESUMEN

La utilización de modelos de simulación en distintos ámbitos de la ingeniería de transporte ha ido en aumento. Para la correcta utilización de los resultados de las simulaciones, es necesario que los modelos hayan sido calibrados y que se haya alcanzado un nivel aceptable de validación para ciertas características del tráfico.

A partir de información presente en bases de datos pre-existentes u obtenida por medio de mediciones realizadas en terreno utilizando distintas metodologías de recolección, fue posible desarrollar esta investigación de tal forma de establecer una metodología de calibración aplicable a modelos de simulación microscópica de tráfico.

La metodología fue aplicada para calibrar el modelo GETRAM (Generic Environment for Traffic Analysis and Modelling), y determinar nuevos valores por defecto para los parámetros que rigen el comportamiento vehicular, de tal forma que sirvan de base para otras experiencias, o al menos como valores por defecto más precisos y ajustados que los que trae el modelo.

Los resultados encontrados muestran una importante relación entre los distintos parámetros al momento de replicar el comportamiento vehicular. Estas relaciones dan origen a la metodología de calibración propuesta. La aplicación de la metodología para calibrar GETRAM reduce el indicador de desempeño (I.D.) analizado de un 27,2% a un 10,2%. Este indicador cuantifica la diferencia que existe entre valores reales que se desean replicar y los valores obtenidos del modelo. En el caso del ejercicio de validación realizado con los mismos indicadores en una red diferente, el I.D. disminuye de un 32,9% a un 14,9%. Al analizar otros indicadores en la misma red y período se obtiene un cambio de un 14,3 a un -6,4% de error.

1. INTRODUCCIÓN

En general, al trabajar con modelos de simulación se ha utilizado valores de parámetros por defecto, en parte debido a la dificultad en la toma de datos o a la dificultad al buscar un procedimiento de calibración y validación establecido.

El objetivo general de esta investigación fue adecuar el modelo GETRAM de simulación microscópica para su correcta utilización en una realidad distinta a la que le dio origen. Lo anterior es relevante debido a las características socioculturales propias de los conductores en Chile, y a las características técnicas del parque vehicular chileno dependientes del nivel socioeconómico de sus propietarios. El estudio fue realizado para flujos *interrumpidos* en la ciudad de Santiago (Velasco, 2004).

Los objetivos específicos del estudio fueron: determinar los parámetros a calibrar y su valor para ser utilizados en GETRAM, determinar una metodología de recolección de información, obtener una adecuada calibración y validar el modelo para una red concreta.

2. DISEÑO DEL EXPERIMENTO DE CALIBRACIÓN

En áreas urbanas, las condiciones de viaje dependen principalmente del comportamiento en las intersecciones, sobre todo en aquellas semaforizadas. Por esto, es esencial reflejar bien los fenómenos que caracterizan su comportamiento.

2.1 Sensibilidades

Es importante lograr aislar los parámetros que son responsables de los distintos fenómenos que rigen el comportamiento en una intersección y, por lo tanto, su capacidad. Los aspectos de la modelación considerados relevantes fueron aquellos que influyen sobre: la capacidad de intersección, la desaceleración al detenerse un vehículo frente a una luz roja, la aceleración al comenzar un vehículo su movimiento frente a una luz verde, el perfil de descarga de un semáforo y la longitud de colas.

Del análisis de los fenómenos listados anteriormente se obtuvieron conclusiones relevantes, además de las relacionadas con el rol que toman los parámetros en una maniobra vehicular específica. La primera dice que para estudiar el perfil distancia-tiempo durante el frenado, el hacerlo utilizando la fórmula analítica de desaceleración llevaría a errores. La segunda indica que las mediciones directas en terreno de este parámetro **no son un aporte directo** para el tema, ya que los valores ingresados no son los que experimenta realmente los vehículos al desplazarse por una red, debido a que la tasa ingresada es una cota para la desaceleración máxima que puede experimentar un vehículo en caso que la maniobra no sea de emergencia.

Del análisis mencionado anteriormente, los parámetros considerados para el proceso de calibración fueron:

- Influencia sobre capacidad de intersección: Tiempo de reacción en detención (TRS), Tiempo de reacción (TR), Desaceleración normal, Largo, Límite de velocidad, Aceptación de límite de velocidad (θ), Máxima aceleración y Distancia mínima entre vehículos.
- Influencia sobre desaceleración al detenerse un vehículo frente a una luz roja: Tiempo de reacción (TR) y Desaceleración normal.
- Influencia sobre aceleración al comenzar un vehículo su movimiento frente a una luz verde: Tiempo de reacción en detención (TRS), Tiempo de reacción (TR) y Máxima aceleración, Límite de velocidad y Aceptación de límite de velocidad (θ).
- Influencia sobre el perfil de descarga de un semáforo: Tiempo de reacción en detención (TRS), Tiempo de reacción (TR), Desaceleración normal, Largo, Límite de velocidad, Aceptación del límite de velocidad (θ) y Distancia mínima entre vehículos.
- Influencia sobre longitud de colas: Tiempo de reacción en detención (TRS), Tiempo de reacción (TR), Desaceleración normal, Largo, Límite de velocidad, Aceptación del límite de velocidad (θ), Aceleración máxima y Distancia mínima entre vehículos.

En forma adicional, otros parámetros que también fueron considerados en el proceso de calibración debido a su influencia específica en redes concretas son: Ancho, Velocidad de yellow-box, Distancia zona 1 y Distancia zona 2.

2.2 Proceso de Calibración

El esquema propuesto en esta investigación se basa en la premisa, comprobada en los análisis de sensibilidad, de independencia entre ciertos fenómenos dentro de la modelación y simulación de los vehículos dentro de una red. Es posible descomponer la simulación de un vehículo en varios fenómenos que pueden ser estudiados por separado, dando origen a su comportamiento real a lo largo de la red, en la cual interactúa con otros vehículos. Así, se plantea que la forma de abordar el comportamiento vehicular en una red es analizar, en primer lugar, los distintos fenómenos independientes, y luego los fenómenos que engloban la interacción entre ellos. El enfoque debe comenzar por los aspectos más sencillos, hasta concluir en los procesos más complejos ya que así es posible que sus distintos componentes hayan sido acotados o definidos previamente.

En forma general el proceso de calibración sigue un procedimiento esquematizado en el que se utiliza un enfoque rígido compuesto de dos partes:

- a) Medición en terreno (u obtención de datos empíricos) de todos los parámetros cuyo significado es claro y posible de interpretar, de forma de encontrar la relación que posee con los fenómenos que se observan en la vialidad local.
- b) Obtención, por medio del modelo de microsimulación, de los valores de los parámetros que son más difíciles de medir directamente de los fenómenos que se observan en la vialidad local.

Este enfoque asegura que los resultados de la calibración tengan un significado real, ya que muchos de los parámetros son directamente observados y no estimados, con lo cual las combinaciones posibles de los valores de los parámetros que es necesario estimar es menor.

En general, los parámetros posibles de ser medidos directamente en terreno dicen relación con características vehiculares que involucran el comportamiento de cada uno de los vehículos,

independiente de las condiciones del flujo circulante (nivel 1). También hay parámetros que son responsables de una maniobra más compleja por parte del vehículo, en el cual influye su posición dentro de la red y más de un parámetro a la vez (nivel 2). Finalmente, se encuentra el nivel 3, que corresponde a aquellos parámetros que establecen la forma en cómo los niveles anteriores se integran a lo largo de la red. Estos últimos son los que son determinados por medio de un proceso iterativo en el cual un indicador de desempeño entrega el ajuste que se logra a nivel de red.

Los niveles deben ser analizados en forma consecutiva: nivel 1, nivel 2 y, finalmente, nivel 3. Los parámetros pueden compartir distintos niveles, por lo cual, los valores o los límites de sus valores encontrados en un nivel anterior son un buen *input* para la calibración que involucra al nivel siguiente (debido a esto es el orden establecido).

Teniendo lo anterior en mente, es necesario definir la forma en la cual cada uno de los parámetros sujetos a calibración es obtenido.

a) *Medición en terreno u obtención de datos empíricos (nivel 1)*: En algunos casos es necesario revisar bases de datos existentes, observar y medir el comportamiento vehicular o consultar estudios desarrollados en forma paralela a esta investigación. A continuación se presentan los parámetros de este tipo sujetos a calibración junto con la forma detallada por medio de la cual esto va a ser desarrollado.

i) *Largo y Ancho*: ambos parámetros son obtenidos de bases de datos que caracterizan el parque vehicular de Santiago. La base utilizada corresponde a la nómina existente en las plantas de revisión técnica (Conaset, 2001). Debido a la gran cantidad de vehículos que hay en la ciudad de Santiago, se creyó necesario realizar una muestra representativa de ellos, considerando las características vehiculares de distintos tipos de parque vehicular, tanto de nivel socioeconómico alto, medio como bajo. Para cada segmento (obtenidos a partir de una zona representativa de la ciudad) se definió los 15 modelos de vehículos livianos de licencia de conducir tipo B, que se encuentran en mayor número. Para cada uno de ellos fueron determinadas las características físicas que representan los dos parámetros en estudio.

ii) *Aceptación de límite de velocidad, Límite de velocidad y Velocidad máxima deseada*: por medio de estos parámetros se busca reflejar la velocidad máxima a la cual circularían los vehículos, si es que las condiciones de tráfico no les impusieran limitaciones. Fue necesario realizar mediciones directas en terreno, debido a que las velocidades de circulación libre son dependientes de varios factores, como son: el número de pistas presentes, la visibilidad disponible, la calidad del pavimento, etc. Por esto se considera que la utilización de datos de velocidades libres en zonas que no corresponden a las redes de calibración puede llevar a conclusiones inadecuadas. Se seleccionó puntos representativos en cada uno de los ejes que conforman la red vial de calibración. El horario en el cual se realizaron las mediciones correspondió a Punta Mañana, de tal forma de captar el tipo de comportamiento analizado en esta investigación. En cada uno de los ejes se demarcó una distancia determinada en la superficie del pavimento, y se cronometró el tiempo utilizado por los vehículos que circulaban en forma libre para recorrerla. El procedimiento fue grabado en formato de audio, dejando constancia de los momentos en los cuales los vehículos tocaban las marcas, asegurando cierto nivel de exactitud en la toma de datos.

Con los datos obtenidos se busca obtener un único valor para el parámetro θ (Aceptación del límite de velocidad), debido a que éste depende solamente del tipo de vehículo, y no del arco en el cual se encuentra el vehículo. Debido a esto, es necesario considerar en conjunto este parámetro con la Velocidad máxima deseada y el Límite de velocidad, siendo este último un parámetro local (i.e. dependiente del arco en el cual el vehículo se encuentra). Esto se debe a la relación existente entre ambos, donde la velocidad a la cual un vehículo desea circular es $\theta * \text{limite_velocidad}$.

iii) Distancia mínima entre vehículos: este parámetro es medido directamente en terreno. Se seleccionan intersecciones semaforizadas representativas de la red de simulación, y se realizan las mediciones en ellas. Éstas consisten en dimensionar la distancia existente entre el parachoques trasero y delantero de dos vehículos consecutivos que se encuentran detenidos en la luz roja.

iv) Porcentaje de adelantamiento y Porcentaje de recuperación: para mantener cierta compatibilidad con otro tipo de tráfico para el cual ha sido calibrado el modelo GETRAM en Chile (tráfico ininterrumpido) es que se adoptan valores presentes en la literatura (Lacalle, 2003).

b) *Obtención, por medio del modelo de microsimulación, de los valores de los parámetros (nivel 2 y nivel 3):* Se distinguen 2 situaciones:

- Análisis de maniobras particulares de vehículos, como el respeto de ciertas señalizaciones, o la aceleración o desaceleración de vehículos frente a cambios de luces en el semáforo (nivel 2).
- Análisis del comportamiento general de la red, observándose algún indicador que esté presente a lo largo de ella y sea capaz de cuantificar la bondad del modelo para replicar lo que se observa en la realidad (nivel 3).

i) Velocidad de yellow box: el comportamiento que produce este parámetro es observado en terreno. La forma en la cual los vehículos respetan las demarcaciones que indican la prohibición de bloquear los cruces es observada y es posible ajustar este parámetro en cada una de las intersecciones que forman parte de la red de modelación, de tal forma que los vehículos sean igual de respetuosos que en la realidad. Por lo tanto, es un análisis cualitativo. Como corresponde a un parámetro local, su valor puede diferir en cada sección de la red, pero en esta investigación se adoptó un valor único tratando de mantener alguna consistencia entre las secciones de la red y buscando un significado físico para el valor del parámetro.

ii) Máxima aceleración: es relevante considerar que la mayor aceleración que experimenta un vehículo se da al haber estado éste detenido en un semáforo y partir al momento del verde. Si se mide el tiempo que demora un vehículo en recorrer una distancia determinada al haber comenzado detenido, es posible obtener el valor de la aceleración que experimentó el vehículo. Por esto se propone medir el tiempo que toman los primeros vehículos que están detenidos en una cola de semáforo en recorrer una distancia determinada. La elección de este vehículo dice relación con la libertad de experimentar la aceleración que desee. Es posible medir lo anterior demarcando en terreno la distancia a considerar y cronometrando los vehículos. Así es posible obtener los valores de Δd y Δt y con estos valores como base se buscará replicar los perfiles distancia-tiempo por medio del modelo de microsimulación.

iii) Desaceleración normal: el caso de este parámetro es análogo al anterior y se asume la misma metodología. Eso sí, las mediciones se realizan al detenerse los vehículos, llegando finalmente a velocidad 0 km/hr.

iv) Tiempo de reacción y Tiempo de reacción en detención: los valores de ambos parámetros son consecuencia del proceso de calibración planteado en esta investigación.

Para su determinación es necesario realizar las simulaciones de la red de calibración, y buscar replicar los indicadores de calibración, por medio del ajuste de ellos. Son parámetros que no influyen solamente en una maniobra del vehículo circulante, sino que el comportamiento general en la red se debe a ellos.

2.3 Criterio para calibrar

La forma en que es calibrada la red sigue los comentarios presentados en la sección anterior. Se considera que aquellos parámetros que fueron medidos directamente en terreno tienen un ajuste perfecto con la realidad. Aquellos para los cuales se hace una estimación a partir de fenómenos particulares de comportamiento, como la aceleración o desaceleración son ajustados de tal forma de replicar aquellos fenómenos por los cuales fueron medidos. A su vez, estos valores así obtenidos no son únicos, sino que definen un espacio factible de soluciones. Los posibles valores son ingresados de tal forma de mejorar el indicador seleccionado para cuantificar el comportamiento general de la red por medio de un proceso iterativo. Por último, los parámetros que no son medidos ni deducidos de ningún comportamiento particular de la red son modificados dentro de los límites establecidos por medio del proceso iterativo mencionado anteriormente, de tal forma de mejorar el indicador seleccionado para cuantificar el comportamiento general de la red.

Se considera que una red está correctamente calibrada, en primer lugar, si la visualización de la simulación corresponde a lo que fue observado en la realidad. Junto con este análisis cualitativo se analiza un indicador de desempeño que debe ser capaz de reflejar lo que sucede en toda la red.

Indicador de Desempeño (I.D.)

Se consideró que la variable más relevante al momento de replicar el comportamiento de una red con características de tráfico interrumpido corresponde a las colas formadas en los accesos de las distintas intersecciones, ya que depende de la forma en como los vehículos llegan y parten de un cruce, así como del flujo circulante, movimientos existentes y del respeto por la señalización. Así, el indicador utilizado en esta investigación está determinado por la variable *colas*.

$$I.D = \sum_i^{\text{accesos}} \left(\left(\frac{|cola_{simulada,i} - cola_{observada,i}|}{cola_{observada,i}} \right) * \frac{cola_{observada,i}}{cola_{observada,red}} \right) \quad (1)$$

donde i son los arcos que llegan a una intersección, y que conforman toda la red. El término final hace que las colas de mayor magnitud presentes en la red sean más relevantes que las pequeñas.

Considerar las colas como la variable incluida en el I.D. en este proceso de calibración no es problema, ya que el hecho de que el proceso sea secuencial, en el cual primero se replican ciertos

fenómenos más simples, hace que estos procesos analizados en forma previa estén bien replicados de por sí (independiente del proceso iterativo desarrollado después).

Proceso Iterativo

El comienzo del proceso iterativo consiste en la incorporación de todos los parámetros que ya han sido definidos. En esta categoría se encuentran: parámetros relacionados con la geometría de la red (su generación es automática dada la correcta codificación de la red), dimensiones vehiculares (Largo y Ancho), parámetros relacionados con la velocidad (Aceptación de límite de velocidad, Límite de Velocidad y Velocidad máxima deseada), Velocidad de yellow box y parámetros relacionados con maniobras de cambio de pista (Porcentaje de adelantamiento y Porcentaje de recuperación)

Una vez que todos ellos han sido incorporados, es necesario realizar las variaciones de aquellos que han sido acotados, pero no definidos. Clave es la relación que fue establecida entre los distintos parámetros al momento de definir los espacios factibles de solución. Así, si el TR es establecido en un valor, es importante que parámetros como Máxima aceleración, Desaceleración normal y TRS estén en valores asociados al primero. Así, el primer cambio necesario que es aplicable a todos los parámetros mencionados en el párrafo anterior es que éstos sean definidos inicialmente en el espacio de soluciones factibles. Se recomienda que los parámetros que poseen una distribución sean incorporados sin ésta en un principio. Lo anterior, para poder establecer claramente el valor de su media, y una vez que éste haya sido definido se puedan establecer los valores máximos, mínimos y las desviaciones estándar correspondientes.

Junto con esto, es necesario observar qué sucede con las colas que dan origen al I.D. y la forma en como se descargan ciertos semáforos, para poder determinar la dirección de los cambios que serán incorporados en adelante al proceso iterativo. Si las colas que son entregadas como resultado de las simulaciones son, en general, menores que las medidas en terreno, y a su vez, en la descarga de los semáforos se observa que en los primeros intervalos se descarga mayor cantidad de vehículos, entonces se recomienda aumentar TR, lo cual puede implicar cambios en los otros parámetros que se están definiendo, de tal forma de estar siempre dentro del espacio factible definido previamente.

Se recomienda que los valores iniciales de los parámetros a definir comiencen el proceso iterativo tomando el valor de una de sus cotas. En el caso de esta investigación, todos los valores iniciales tomados fueron aquellos que significaban una menor longitud de colas debido a que en la situación base las colas eran subestimadas. El asumir estos valores significa una mejora en el I.D. respecto a la situación base y aquella en la cual los parámetros que no forman parte del proceso iterativo ya fueron incorporados, indicando que los espacios factibles fueron correctamente definidos.

Se aumenta el valor de TR hasta que un aumento adicional signifique un empeoramiento claro en los índices bajo estudio. Una vez que el límite de TR es fijado, se continúa con el parámetro que se relaciona en forma más directa con él. Es el caso de Desaceleración normal. Es necesario identificar si las colas componentes del I.D. son mayores o menores que las medidas en terreno, y la relación entre las descargas observadas y simuladas, de tal forma de establecer la dirección de cambio del parámetro en estudio, llegando como máximo al límite dentro del espacio factible definido inicialmente.

Una vez que estos valores son fijados, se continúa con aquel parámetro faltante que está involucrado en mayor número de maniobras a lo largo de la simulación, que es Máxima aceleración, en perjuicio de TRS (último en ser calibrado). Esto se debe a que este último sólo influye en la partida de los vehículos cuando éstos se encuentran detenidos, mientras el anterior lo hace en cada maniobra que implique cambios en la velocidad.

El proceso iterativo tiene su fin una vez que el I.D. es considerado suficientemente bueno. En el caso de esta investigación, esta situación se alcanzó luego de 23 iteraciones. El proceso de calibración es resumido en la Figura 1.

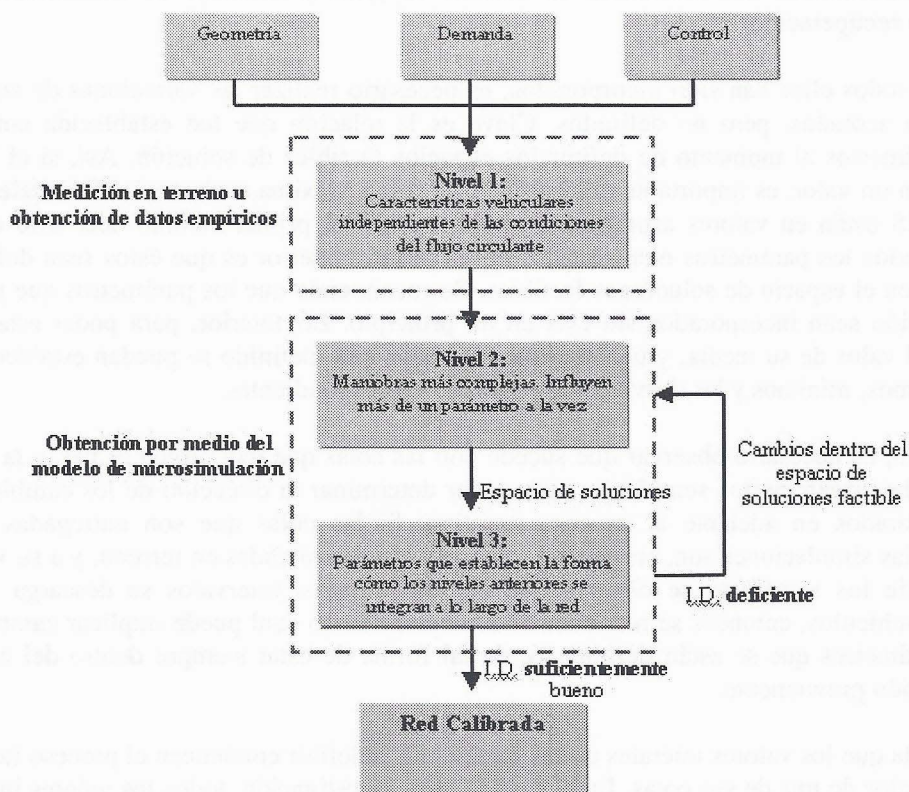


Figura 1: Esquema proceso de calibración.

Durante el proceso iterativo es muy importante ir detectando los “cuellos de botella” y la causa de su formación. Cuando se detecta uno durante la calibración de los 4 parámetros que se busca definir en este proceso iterativo y éste no es deseado, es necesario **observar** los fenómenos particulares que allí suceden y subsanarlos corrigiendo comportamientos locales (por medio de parámetros de este mismo tipo), de tal forma de poder continuar el proceso de calibración.

2.4 Red de Calibración

La elección de la red de calibración se debió a que en ella existían principalmente vehículos particulares, poseía un tamaño “adecuado” de tal forma de alcanzar a percibir efectos de red, las calles no tenían pendientes, había pocas calles pequeñas que aportaran flujos, tenía cierto grado de saturación de tal forma que algunas colas pudieran ser analizadas y tenía programación fija de semáforos.

3. RESULTADOS DEL PROCESO ITERATIVO

La primera figura muestra la evolución del I.D. considerando la hora completa de simulación, mientras la segunda figura muestra el I.D. para cada sub-período de 15 minutos considerados en la simulación.

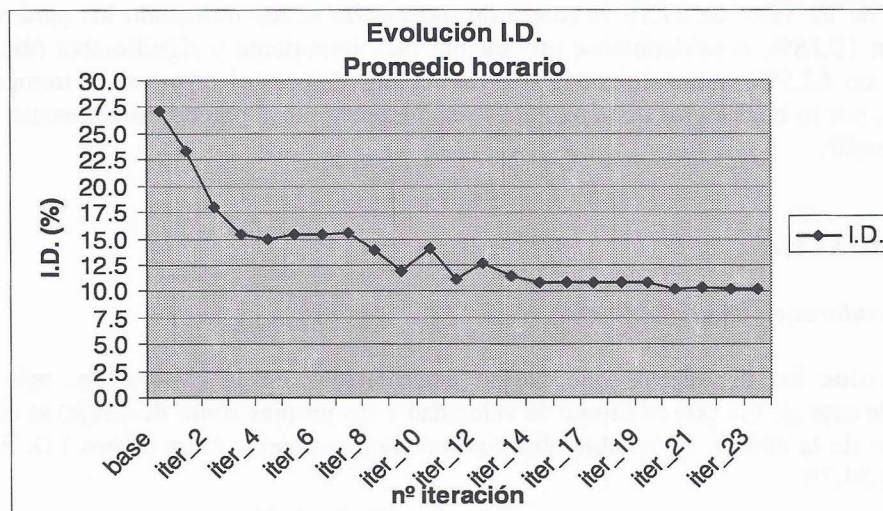


Figura 1: Evolución del I.D. a lo largo del proceso iterativo

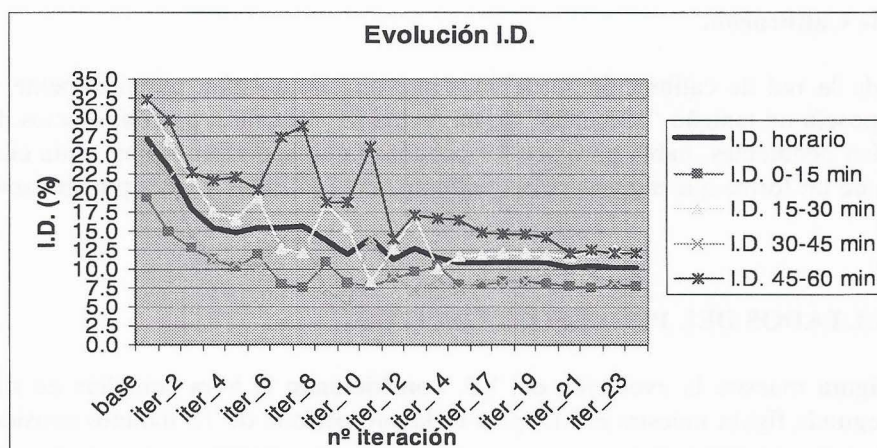


Figura 2: Evolución del Indicador de Desempeño

El I.D. pasa de un valor de 27,16 % (obtenido modelando la red utilizando los parámetros por defecto) a un 10,18%, considerándose una mejora muy importante y significativa (disminución del error en un 62,5%). Aun utilizando los valores por defecto el error no es tremendamente significativo, por lo cual lograr disminuciones importantes podría parecer inicialmente una tarea difícil de cumplir.

4. VALIDACIÓN

Mismos indicadores en una red diferente

Al aplicar todos los parámetros que fueron determinados en la calibración, más aquellos específicos de este eje (su propio Límite de velocidad y sus propias zonas de viraje) se obtuvieron los resultados de la tabla 1. Es posible observar una mejora notable entre ambos I.D. El error se reduce en un 54,7%.

Tabla 1: I.D. (%) en Ejercicio de validación

PERIODO	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	PROMEDIO
base	27,29	29,87	32,41	42,14	32,93
validación	22,62	16,31	15,18	5,62	14,93

Otros indicadores en la misma red y período

Se estima que para el ejercicio de validación es altamente enriquecedor observar lo que sucede con variables que no fueron cuantificadas durante la calibración y que tienen importancia al momento de describir la forma como se comportan los vehículos en redes cuyo tráfico es interrumpido. Entre ellas se destaca la *capacidad* de los accesos en una intersección semaforizada. Junto con ser una variable que engloba muchos fenómenos de comportamiento vehicular, se cuenta con estudios acabados de ella en la ciudad de Santiago de Chile (Bartel 1997, Herrera 2002). Como ejercicio de validación, se comparó las capacidades teóricas definidas por Herrera (2002) con aquellas extraídas del modelo calibrado en esta investigación. Se calcula el

error porcentual entre ambos valores y luego se promedian éstos para obtener un error promedio general. El ejercicio considera un acceso a una intersección semaforizada por eje, debido a que el resto de los accesos de un mismo eje posee los mismos parámetros (diferencia entre ejes es por el tema de las velocidades). Los resultados de la validación se presentan en la tabla 2, donde es posible observar que el error promedio de 14,28% baja a un -6,43%.

Tabla 2: Error respecto a capacidad teórica

Junctio	Access	Lane width	Validation	Default
Pocuro / Lyon	Pocuro_turn exclusive	3,25 mts	-6.71%	16.34%
	Pocuro_directo	3,25 mts	-4.87%	10.84%
Pocuro / Lyon	Lyon	3,25 mts	-14.20%	9.55%
Mar del Plata / Lyon	Mar del Plata	3,25 mts	-4.98%	13.94%
Carlos Antúnez / Lyon	Carlos Antúnez	3,25 mts	-9.04%	12.70%
Suecia / Eliodoro Yáñez	Suecia	3,25 mts	-1.74%	17.33%
Suecia / Eliodoro Yáñez	Eliodoro Yáñez	3,25 mts	-3.43%	19.26%
	MEAN	3,25 mts	-6.43%	14.28%

5. RESUMEN DE PARÁMETROS FINALES

En la tabla 3 se presenta aquellos parámetros que fueron obtenidos del proceso de calibración desarrollado en esta investigación. Se entrega además todos aquellos que no son propios de la red específica utilizada para la calibración y que pueden ser utilizados como buenos valores por defecto en otras circunstancias. La columna que indica los valores por defecto que posee el programa, presenta la información de acuerdo al siguiente formato: media, desviación estándar, máximo y mínimo. Con esta tabla un usuario puede comenzar un estudio con mejores valores por defecto.

Tabla 3: Parámetros finales obtenidos del proceso de calibración

Parámetro	Valores por defecto iniciales	Media	Desv. Estándar	Máximo	Mínimo
Largo	(4,00 ; 0,00 ; 4,00 ; 4,00)	4,32	0,31	4,98	3,73
Ancho	(2,00 ; 0,00 ; 2,00 ; 2,00)	1,70	0,04	1,82	1,61
Aceptación de límite de velocidad	(1,00 ; 0,00 ; 1,00 ; 1,00)	1,00	0,16	1,50	0,61
Velocidad máxima deseada	(100 ; 20 ; 150 ; 80)	110	20	150	80
Distancia mínima entre vehículos	(1,00 ; 0,00 ; 1,00 ; 1,00)	1,73	0,67	4,45	0,46
Velocidad de yellow box	14,40	3,6			
Desaceleración normal	(4,00 ; 0,00 ; 4,00 ; 4,00)	3,20	0,23	4,00	2,50
Máxima aceleración	(2,80 ; 0,00 ; 2,80 ; 2,80)	2,57	0,70	5,80	1,36
TR	0,75	0,90			
TRS	1,00	1,10			

6. CONCLUSIONES

Se ha analizado a fondo el modelo de microsimulación GETRAM, comprendiendo la modelación del comportamiento vehicular al haberse realizado los análisis de sensibilidad correspondientes. Se ha identificado los parámetros relevantes para el tipo de flujo analizado, junto con los efectos que las variaciones en sus valores producen.

Al desear contar con información para los distintos parámetros, siendo algunos medidos en forma directa y otros obtenidos como resultado de las simulaciones, fue necesario identificar las fuentes

de información disponibles, siendo incluso definidas metodologías de recolección de información que son consideradas de gran utilidad para otras investigaciones que la necesiten.

Respecto a los resultados obtenidos, que son cuantificados por medio del I.D. en el proceso de calibración, y corroborados por el porcentaje de error para la validación, se llegó a una situación de gran progreso respecto a la situación original o base. El I.D. tuvo una disminución de un 27,16% a un 10,18%, considerándose una mejora muy importante y significativa (disminución del error en un 62,5%). En el caso de la validación (que significó un doble ejercicio) se obtuvo mejoras que hacen confirmar que la calibración fue adecuada. En el caso de la validación realizada utilizando otra red se llega a una disminución del I.D. de un 32,93% a un 14,93%, y en el caso del análisis de otra variable no considerada en la calibración (capacidad) para la misma red se pasa de un error del 14,28% al -6,43%.

Es posible afirmar que tanto la metodología (de toma de datos y de calibración) como los valores obtenidos son aplicables como base para futuros ejercicios de simulación en Santiago.

A futuro se considera importante compatibilizar los resultados de los distintos tipos de tráfico, siendo especialmente relevante el caso de las autopistas urbanas (concesionadas), en las cuales los ejes de tráfico ininterrumpido comparten la red por la cual circulan con vías locales de tráfico interrumpido.

Finalmente, las limitaciones que actualmente son inherentes a GETRAM deben ser corregidas, de tal forma que el proceso de calibración pueda ser afinado aún más. También será de ayuda una mayor tecnología de medición para poder obtener valores para otras variables de tráfico.

REFERENCIAS

Bartel G., J. Gibson y J.E. Coeymans (1997) Redefinición de los parámetros de capacidad de una intersección semaforizada bajo condiciones de tráfico mixto. **Actas del VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Santiago, Chile.**

Conaset (2001), Base de Revisiones Técnicas, Santiago.

Herrera J. C (2002), Estimación de parámetros de capacidad en pistas con viraje, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Lacalle M. (2003), Calibración del microsimulador AIMSUN para flujo ininterrumpido en la ciudad de Santiago, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Velasco, L. M. (2004), Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: GETRAM en Santiago, Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Universidad Católica de Chile.