
CALIBRACION DE FUNCIONES FLUJO-VELOCIDAD EN CAMINOS DE CALZADA SIMPLE BASADAS EN SIMULACION

Felipe Masjuán U. y Sergio González T

ARISTO Consultores Ltda.

Fidel Oteiza 1916, Of. 801 – Providencia – Santiago – Chile

fax: (2 56) 274 6188 – email: aristo@ia.cl

Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Planificación de Inversiones
en Infraestructura de Transporte, SECTRA

Teatinos 950 Piso 16

Fax: (2 56) 696 6477

RESUMEN

En este trabajo se propone una nueva metodología para la calibración de relaciones flujo-velocidad y flujo-tiempo por tipo de vehículo para caminos interurbanos en calzada simple. Esta se basa en una estratificación de tipos de caminos según sus variables geométricas y en la obtención de los datos de calibración a partir de la simulación de los caminos tipo con el modelo COPER, para condiciones a flujo libre, y con el modelo microscópico TRARR para la simulación de la interacción vehicular. Adicionalmente, las relaciones de equivalencia entre vehículos se estiman, para cada camino tipo definido, a través de un método heurístico de búsqueda.

Las formulaciones encontradas se adaptan a una amplia gama de combinaciones operacionales, incorporando, en el caso de las relaciones flujo-velocidad, el efecto del flujo en el sentido opuesto, lo cual permite estimar las velocidades para repartos por sentido, simétricos y asimétricos. Los modelos encontrados presentan buenos grados de ajuste respecto de los datos obtenidos por simulación, con errores medios de no más de 3 km/hr y coeficientes de correlación superiores a 0,90. En el caso de las relaciones flujo-tiempo, se calibraron funciones con estricta convexidad, requisito para ser incorporadas en modelos de asignación, lo cual, a pesar de ser una representación simplificada del fenómeno, permitió obtener resultados igualmente satisfactorios.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas clásicos de la ingeniería de transporte corresponde al estudio del efecto que produce en la velocidad de un vehículo o conjunto de vehículos la variación del volumen del flujo vehicular en un tramo vial y período determinado. Dicho fenómeno ha sido estudiado de manera prioritaria en ambientes urbanos donde se presentan redes viales con altos niveles de congestión y donde se ha desarrollado una amplia experiencia en modelación y simulación del flujo vehicular. En este caso, el enfoque de modelación se ha centrado en la modelación de las intersecciones, las cuales generan los mayores problemas de congestión, simplificándose el tratamiento de los arcos, en particular, debido a que no se presenta la situación de adelantamientos frente a tráfico en dirección opuesta. El objetivo de este estudio se dirige al análisis de las relaciones entre el flujo vehicular en arcos viales interurbanos en calzada simple, con la velocidad y tiempo de circulación.

La situación de carreteras en calzada simple, en que todos los vehículos en una dirección comparten la misma calzada y en que los adelantamientos se producen por la calzada opuesta, presenta un sinnúmero de dificultades de modelación que ha llevado generalmente a darle un tratamiento simplificado. De partida, la gran cantidad de situaciones que es posible encontrar, en términos de combinaciones geométricas y de flujo vehicular, hace difícil poder medir el conjunto de parámetros necesarios para después modelarlos. En la presente investigación, se aprovecha la disponibilidad de un modelo de simulación de tráfico de alta confiabilidad, como es el TRARR (ARRB, 1985; Alvarez, 1998), para construir tantas situaciones de tráfico y geometría vial como se estime necesario con el objeto de obtener modelos flujo-velocidad y modelos flujo-tiempo confiables. La construcción de estos modelos requiere agregar flujo vehicular heterogéneo con fines de modelación, lo cual exige, de paso, enfrentar el tema de las relaciones de equivalencia entre vehículos, aspecto que se resuelve de una manera novedosa utilizando modelos heurísticos de búsqueda.

En los puntos siguientes se discute el marco teórico en que se sustenta el desarrollo del estudio, se describe la metodología específica utilizada y se presentan los resultados principales de la calibración tanto de las funciones flujo-velocidad como flujo-tiempo.

2. MARCO TEÓRICO

La velocidad de operación de un vehículo en una carretera en calzada simple depende de múltiples factores. Entre ellos, las características geométricas de la vía definen una velocidad de operación denominada "Velocidad de Flujo Libre", la cual además es función de las características técnicas de los vehículos que circulan y de variables de comportamiento de los conductores.

Si se consideran fijas las variables relacionadas con la geometría del camino, características de los vehículos y variables de comportamiento, la velocidad media de operación resultante en un camino tendrá directa relación con las condiciones de operación que en un momento dado (período) son prevalecientes. Las condiciones de operación corresponden al nivel o magnitud del flujo vehicular existente, su composición y partición por sentido de circulación, a partir de lo cual se define el nivel de interacción entre los vehículos. Este último se ve incrementado cuando en la corriente vehicular hay presencia de vehículos lentos, los cuales deben ser adelantados por los vehículos más ligeros de manera

de intentar mantener su velocidad deseada (o de flujo libre). En las maniobras de adelantamiento es donde interviene la partición del flujo por sentido, ya que al margen de la posibilidad de adelantar - determinada por la geometría y distancia de visibilidad - la magnitud del flujo opositor determina la existencia de brechas adecuadas para realizar la maniobra.

Las características antes mencionadas condicionan la operación en una vía en calzada simple bidireccional, lo cual a su vez define su capacidad. La capacidad corresponde al número máximo de vehículos (en ambos sentidos) que pasan por una sección de un camino de características específicas ante dichas condiciones de operación. Cuando la demanda sobrepasa el valor de la capacidad, se produce un fuerte decrecimiento tanto del flujo vehicular como de la velocidad, definiendo una condición de sobresaturación (TRB, 1992; Akcelik, 1995).

De lo anterior se advierte una diferencia fundamental al relacionar la velocidad de circulación con el flujo vehicular respecto de la velocidad en relación con la demanda vehicular. El flujo vehicular corresponde a la cantidad de vehículos que pasa por un punto específico en un intervalo de tiempo, mientras que la demanda se define como la cantidad de vehículos que quiere circular por un tramo de camino en un intervalo de tiempo. Cuando la demanda vehicular crece y sobrepasa el valor de la capacidad (número máximo de vehículos que puede pasar por una sección dada, ver Figura N°1), a partir de dicho punto tanto la velocidad como el flujo vehicular disminuyen, llegando teóricamente ambos a un valor igual a cero dado que la circulación se detiene y, por ende, la velocidad y el flujo son iguales a cero (TRB, 1992; Akcelik, 1995). Al analizar el segundo caso, lo que se observa es que a mayor demanda, la velocidad disminuye y sobrepasando el valor de la capacidad ésta decrece rápidamente tendiendo a cero asintóticamente (Figura N°2). En Road & Transport Research (1996), se muestra un análisis equivalente citando el trabajo de Akcelik (1995), donde también se afirma, citando a Luk and Hepburn (1995) que la relación demanda-velocidad es la que mejor representa la demanda agregada de viajes en una red vial.

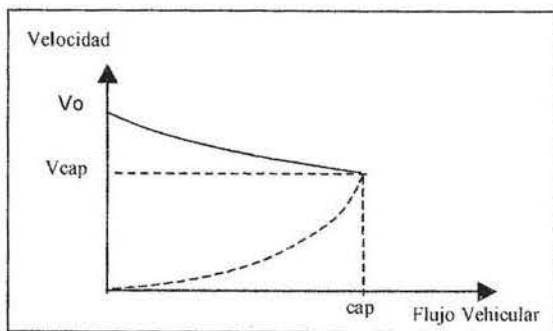


Figura N°1: Relación Flujo Vehicular / Velocidad

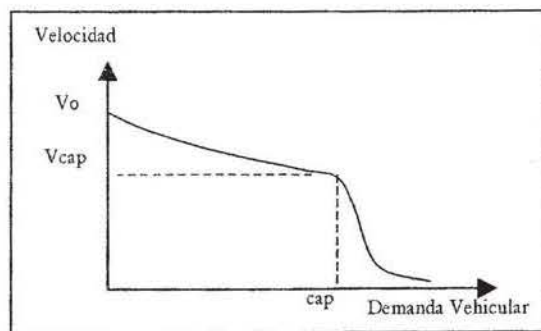


Figura N°2: Relación Demanda Vehicular / Velocidad

De acuerdo a lo anterior, la relación que en este trabajo es determinada y calibrada corresponde a la velocidad en función de la demanda vehicular. Sin embargo, para efectos de notación, en adelante se seguirá denominando como **Función Flujo-Velocidad**. Cabe mencionar, que la forma que adopta el tramo de la curva por sobre el valor de la capacidad del camino responde a un supuesto teórico, ya que el fenómeno en este rango es muy difícil de estudiar con observaciones reales, siendo un terreno prácticamente inexplorado.

La búsqueda de relaciones flujo-velocidad para caminos en calzada simple no es nueva, sin embargo, el tratamiento que se le ha dado al tema en nuestro país hasta ahora ha sido en términos simplificados (CDI, 1992; TRASA, 1995). La tendencia ha sido la de construir relaciones sobre la base de funciones lineales por tramos, lo cual en sí no es una mala aproximación, pero frente a las numerosas simplificaciones utilizadas los modelos resultan muy limitados. Estos modelos, llamados “Trizionales” (Figura N°3), en primer lugar, se han definido en función del flujo total del camino o del flujo en el sentido en que se requiere estimar la velocidad, con lo cual no se considera explícitamente el efecto que el flujo en el sentido opuesto ejerce sobre las velocidades de los vehículos; en segundo lugar, las relaciones calibradas sólo han considerado la estimación de velocidades para vehículos livianos, utilizando para los otros tipos de vehículos factores de reducción constantes; en tercer lugar, dada la necesidad de utilizar una medida comparable en términos de los flujos por tipo de vehículo (vehículos equivalentes), los factores de equivalencia utilizados han sido valores típicos sin un análisis en mayor profundidad; y, por último, estos modelos en su formulación han considerado la relación entre la geometría del camino y la velocidad en términos lineales, lo cual puede ser razonable para variaciones pequeñas de los valores de las variables geométricas, pero muy gruesa para ser aplicada al rango factible de dichos valores.

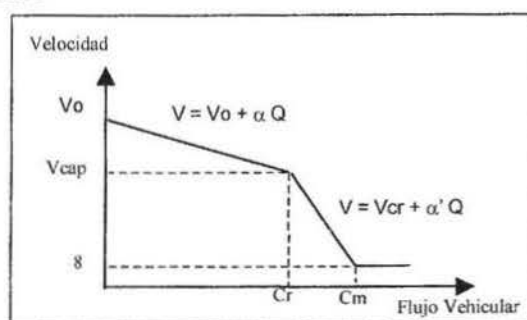


Figura N°3: Modelo Trizonal Flujo-Velocidad

Lo anterior, conlleva a que su aplicabilidad con resultados razonables sólo es posible para una configuración operacional con flujos iguales en cada sentido; los resultados para otros tipos de vehículos no pasan de ser una aproximación gruesa; y para configuraciones geométricas y operacionales extremas se pierde mucha precisión producto de considerar factores de equivalencia únicos y una relación lineal entre los valores geométricos y la velocidad resultante.

3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1 Metodología General

La metodología de este trabajo está relacionada en primer lugar con la obtención de datos para la calibración de las funciones de flujo-velocidad. Esto, se realiza a través de simulación de caminos tipo, es decir, definidos según rangos de sus características geométricas que más influyen en la velocidad (pendiente y curvatura). Para la simulación de cada camino tipo se utiliza el modelo COPER, para la condición de flujo libre y el TRARR para la simulación en congestión. A partir de los datos obtenidos con estos modelos es posible construir una base de datos (pares flujo-velocidad por tipo de vehículo) en que se consideren, para un camino tipo determinado, una gran cantidad de combinaciones operacionales, de manera de generar un tamaño de muestra adecuado para formular y calibrar una relación de flujo-velocidad por tipo de vehículo.

Los modelos COPER y TRARR, han sido ampliamente utilizados en nuestro país y fueron adaptados a las características locales (Universidad de Chile, 1990), por lo que poseen una alta confiabilidad en sus resultados. Además, en este trabajo se utilizan versiones actualizadas en cuanto a los parámetros relacionados con el parque vehicular (A y G Ltda., 1998; Alvarez, 1998) y, en el caso de TRARR, éste fue calibrado previo a las simulaciones intensivas, basándose en mediciones realizadas en terreno. Las condiciones anteriores, permiten que estos modelos se constituyan en adecuadas herramientas para analizar y obtener los datos necesarios para este estudio.

3.2 Categorización de Caminos Tipo

La categorización, tiene por finalidad independizar la modelación de las características geométricas de los caminos, de manera tal de que las variables a considerar en las funciones sean sólo operativas (flujos por tipo de vehículo y sentido). Las características geométricas preponderantes en la velocidad de operación de los vehículos, dado un camino pavimentado en calzada simple, corresponden principalmente a dos; la curvatura horizontal y la pendiente. Los rangos definidos para cada una de estas variables son los siguientes:

$$\text{Pendiente} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Baja (B)} & \text{si } i \leq 2\% \\ \text{Media (M)} & \text{si } 2\% < i \leq 3\% \\ \text{Alta (A)} & \text{si } i \geq 3\% \end{array} \right. \quad \text{Curvatura} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Recto (C)} & \text{si } c \leq 30^\circ/\text{km} \\ \text{Baja (B)} & \text{si } 30^\circ/\text{km} < c \leq 70^\circ/\text{km} \\ \text{Media (M)} & \text{si } 70^\circ/\text{km} < c \leq 120^\circ/\text{km} \\ \text{Alta (A)} & \text{si } c \geq 120^\circ/\text{km} \end{array} \right.$$

Sobre la base de los rangos anteriores, se genera una categorización de 12 caminos tipo, que resulta de todas las combinaciones posibles. En la Tabla N°1, se definen las combinaciones y los valores medios adoptados para cada rango definido.

3.3 Tipología de Vehículos

La tipología de vehículos a utilizar, principalmente por mayor simplicidad, es deseable que sea lo más agregada posible pero intentando no perder precisión en los resultados. Por esto, se consideran 4 categorías; vehículos livianos, camiones simples, camiones articulados y buses. Esta agregación resulta adecuada de acuerdo a los fines perseguidos, ya que el comportamiento de cada uno de estos tipos de vehículos es significativamente distinto.

3.4 Formulación y Calibración de Funciones de Flujo-Velocidad

Sobre la base de la información obtenida a través de los modelos de simulación, se busca una función o un grupo de funciones que mejor reproduzca la forma de la curva de datos, intentando no simplificar ningún efecto.

Para la obtención de funciones de vehículos pesados (camiones articulados, camiones simples y buses), se ha definido que el mejor camino a seguir es el de relacionar la velocidad de estos vehículos con la de

vehículos livianos. Como cada dato de velocidad está asociado a una condición operacional específica, existe una relación identificable y, por lo tanto, representable a través de una formulación matemática, entre las velocidades de los distintos vehículos. Este tratamiento, simplifica la formulación y la posterior calibración, y como se mostrará no se pierde precisión en las estimaciones.

3.5 Determinación de Factores de Equivalencia

Estos factores, representan la equivalencia de cada tipo de vehículo respecto de uno definido como patrón (normalmente el vehículo liviano), asociada a la influencia que cada uno ejerce sobre las velocidades medias del vehículo patrón. Esto se expresa en términos de cuantos vehículos (patrón) ejercen una influencia equivalente a la de un tipo de vehículo específico.

La determinación de los factores de equivalencia se realiza en este estudio probando en forma iterativa los valores que provoquen el mejor ajuste de la función flujo-velocidad en cada caso (método heurístico de búsqueda). Dado que las relaciones (en términos de la formulación) se tratarán separadamente para cada camino tipo, por lo que se independizan de sus características geométricas, es posible utilizar factores de equivalencia diferenciados. De esta manera, se realiza un barrido calibrando los parámetros de la función con distintos valores de los factores en búsqueda de aquellos que otorguen el mejor ajuste a la función. Para determinar cuáles de los factores probados producen el mejor ajuste, se utiliza como criterio de selección, el menor valor del error cuadrático medio de la estimación y mayor R^2 . Con lo anterior, se obtienen valores diferenciados de los factores de equivalencia para cada uno de los caminos tipo considerados. Los resultados en este proceso constituyen un interesante aporte a lo realizado hasta la fecha sobre el tema.

4. CALIBRACIÓN DE FUNCIONES FLUJO-VELOCIDAD

4.1 Obtención de Datos de Simulación

La simulación con los modelos previstos, se realiza construyendo los archivos necesarios sobre la base de la creación de caminos ficticios, los cuales consideran las características geométricas medias de los rangos definidos para cada uno de los 12 tipos definidos. Luego, para cada uno se realizan corridas considerando un total de 172 combinaciones operacionales, las que representan un universo de 344 datos de calibración (se utilizan los resultados de ambos sentidos de circulación). En las combinaciones operacionales (flujos vehiculares) se ha considerado un completo barrido de magnitudes hasta la capacidad, variaciones significativas de la composición (entre 10% y 50% de vehículos pesados), y particiones por sentido de circulación entre 50%-50% y 80%-20%. A estos datos, además se agrega el valor de la velocidad a flujo libre obtenido de COPER (asociado a un flujo 0).

Además, dado que los modelos no son capaces de simular condiciones de operación más allá de la capacidad, se ha adoptado un criterio recomendado por el submodelo de congestión del modelo HDM-3, el cual manifiesta que cuando el flujo es igual a 1,25 veces la capacidad, se le asocia un valor de velocidad de 8 km/hr (condición start-stop).

4.2 Análisis de los Datos de Simulación

Un primer análisis de los datos mostró que el comportamiento de las velocidades seguía un patrón similar para todos los caminos. Luego, para realizar el análisis de los datos se escogió un tipo de camino específico, ya que de acuerdo a lo anterior, la forma funcional en cualquiera de ellos sería la misma, aunque evidentemente los coeficientes y parámetros de la función que resulte deberán ser distintos para cada uno.

Tomando los datos correspondientes al camino tipo 2 (pendiente y curvatura baja), se construyeron gráficos para analizar las formas resultantes. Este análisis sólo corresponde al caso de los vehículos livianos, pues como se ha definido en la metodología, las funciones de los otros tipos de vehículos dependerán de la velocidad de ellos. De manera de visualizar mejor el comportamiento, a modo de ejemplo, la Figura N°4 presenta los datos resultantes para una partición del flujo 50%-50% y la Figura N°5 los datos para una partición 70%-30%¹.

En estas figuras, se observa que las formas de las curvas muestran un mayor decrecimiento de la velocidad al principio y suavizándose hacia los puntos extremos mostrando convexidad en el rango de flujo. En segundo lugar y como era previsto, frente a particiones asimétricas del flujo por sentido se observa una mayor velocidad en el sentido de menor flujo y menor en el de mayor flujo (Figura N°5). Esto último, indica que es necesario considerar en la formulación de las curvas los flujos por sentido como variables separadas, de modo tal de realizar una correcta estimación de las velocidades frente a cualquier configuración de partición.

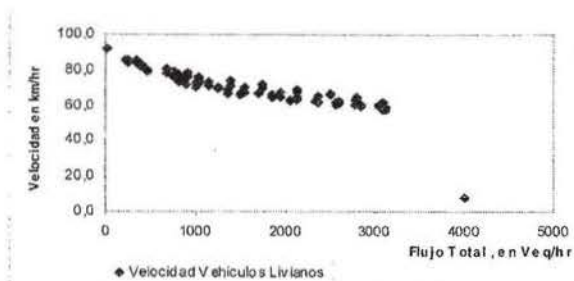


Figura N°4: Datos Flujo-Velocidad Partición 50%-50%

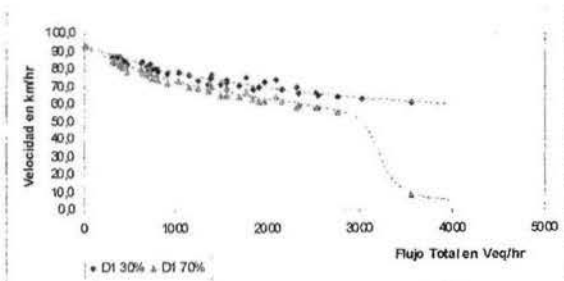


Figura N°5: Datos Flujo-Velocidad Partición 70%-30%

De los gráficos mostrados en las figuras, es importante hacer notar que no se cuenta con información de pares flujo-velocidad más allá de la capacidad, salvo el punto definido a flujo igual 1,25 veces la capacidad, al que se le asocia una velocidad de 8 km/hr (criterio HDM-3). En particular, este punto permitirá reproducir el fuerte descenso que sufre la velocidad superado el umbral de la capacidad. Para estimar la capacidad de los caminos en cada situación, se decidió utilizar un valor teórico, por lo cual se recurrió a la formulación contenida en TRB (1992), quedando definida según la siguiente expresión:

¹ En los gráficos los flujos están expresados en vehículos equivalentes por hora, para lo cual, para efectos de este documento se utilizan los factores que finalmente resultan para el camino tipo 2.

$$\text{Capacidad} = C_i * f_g * f_p \quad (1)$$

donde:

- C_i : Capacidad en condiciones ideales (camino recto, plano y partición 50%-50%) y que corresponde a un valor de 3.200 veh/hr²
 f_g : factor por geometría obtenido de la Tabla 8-1 del TRB (1992)
 f_p : factor por partición obtenido de la Tabla 8-4 del TRB (1992)

4.3 Funciones de Flujo-Velocidad para Vehículos Livianos

A partir del examen de las bases de datos generadas con el modelo de simulación y las formas funcionales de los puntos de observación obtenidos, se concluyó que el fenómeno queda bien representado por una función que mezcla el efecto aditivo de una exponencial decreciente con curvas de tipo logística, obteniéndose la siguiente formulación:

$$V_1 = a e^{-b q_1} + \beta_1 \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\mu_1 - q_1}{\sigma_1}}} \right) + \beta_2 \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\mu_2 - q_2}{\sigma_2}}} \right) \quad (2)$$

Donde:

- V_1 : Velocidad de vehículos livianos, en km/hr, en la dirección 1
 q_1, q_2 : Flujo en vehículos equivalentes por hora en la dirección 1 y 2 respectivamente
 $a, b, \beta_1, \beta_2, \mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2$: Parámetros de la función

Como se puede apreciar, los flujos por sentido en la función definida deben ser expresados en vehículos equivalentes. Para esto, fue necesario determinar los factores de equivalencia asociados a cada camino tipo. La estimación de estos factores se realizó de acuerdo a la metodología expuesta.

A diferencia de anteriores relaciones flujo-velocidad calibradas, tales como lineales o tipo BPR, la gran ventaja que presenta la formulación definida es su gran capacidad de adaptarse a cualquier configuración de reparto de flujos por sentido, capacidad que no tienen las otras relaciones. Por otro lado, los resultados de las funciones calibradas presentaron excelentes ajustes con coeficientes de correlación superiores a 0,97 y lo que es más importante, un error medio (raíz de la suma de los errores cuadráticos) en la estimación bastante bajo, siendo en el peor de los casos de 3 km/hr. Esto último, también se complementa con el hecho de que la dispersión de los errores resultante es bastante homogénea, lo que indica la ausencia de errores sistemáticos.

² Este valor se obtuvo de un estudio realizado en Colombia por la Universidad del Cauca (1996) en que se realizaron estimaciones de la capacidad en condiciones ideales.

Las funciones calibradas se construyeron de manera de ser válidas para cualquier rango de flujos, en donde a partir de un flujo mayor a la capacidad, la velocidad cae fuertemente tendiendo rápidamente a cero cuando la demanda supera un 25% el valor de la capacidad. A continuación, se presenta la Figura N°6, que muestra la forma que toma la función para un camino específico (en este caso 1% de pendiente y 25°/km de curvatura), la que queda representada por una familia de curvas. En la figura, el gráfico de la derecha, cada una de las curvas corresponde a la velocidad en una dirección cuando el flujo en dicha dirección representa distintos porcentajes del flujo total (30%, 50%, 70%). En el gráfico de la izquierda, se representa la velocidad en la dirección 1 cuando el flujo opositor es de diferentes magnitudes (100, 400 y 800 veq/hr).

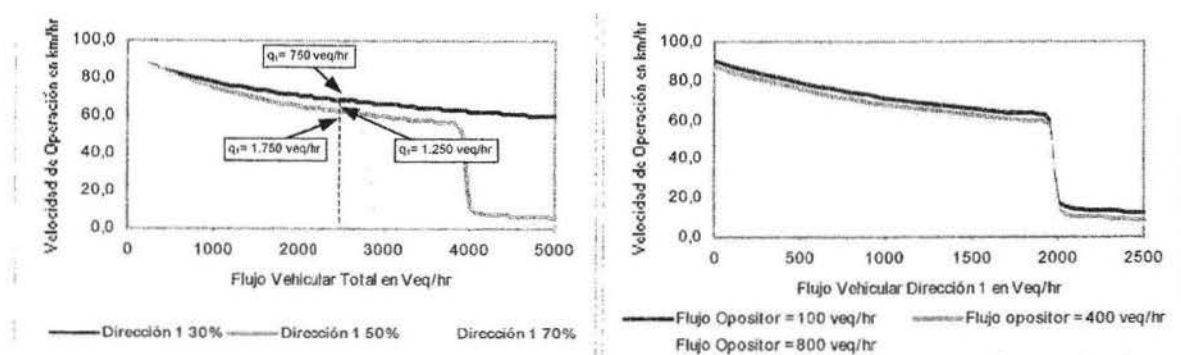


Figura N°6: Curvas Flujo-Velocidad Vehículos Livianos

En la Tabla N°2 se presentan los valores de los coeficientes de la función para vehículos livianos asociados a cada uno de los 12 caminos tipo definidos.

4.4 Funciones Flujo-Velocidad para Vehículos Pesados

En este caso, el camino seguido fue definir y calibrar una relación en función de la velocidad de vehículos livianos, es decir, en función del modelo de velocidades de vehículos livianos.

Del análisis de los datos y gráficos, se observó una clara tendencia de la velocidad de los vehículos pesados en función de la de vehículos livianos (obtenida con los modelos calibrados), concluyéndose que ésta es bien representada por una función como la siguiente:

$$V_{vpi} = a_i \left(1 - \frac{1}{e^{b_i V_{vl}}} \right) + c_i \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\mu_i - V_{vl}}{\sigma_i}}} \right) + \gamma_i \quad (3)$$

Donde:

V_{vpi} : es la velocidad del vehículo pesado i
 V_{vl} : es el modelo de velocidad de vehículos livianos
 $a_i, b_i, c_i, \mu_i, \sigma_i$ y γ_i : parámetros de la función para el vehículo pesado i

En este caso, dado que la velocidad de flujo libre es menor, las curvas respectivas se trazan por debajo de la de vehículos livianos, las que frente al aumento del flujo se van acercando hasta llegar a la capacidad del camino, punto a partir del cual las velocidades de los diferentes tipos de vehículo son aproximadamente iguales. En la Figura N°7 se muestran las curvas de vehículos livianos, camiones y buses para ilustrar lo anterior. En la Tabla N°3 se presentan los valores de los coeficientes de la función para vehículos pesados asociados a cada uno de los 12 caminos tipo definidos

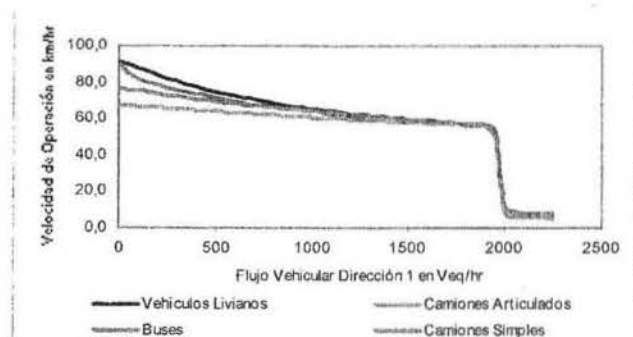


Figura N°7: Curvas Flujo-Velocidad por Tipo de Vehículo

5. FUNCIONES FLUJO-TIEMPO

Una de las principales aplicaciones que tienen las funciones flujo-velocidad o flujo-tiempo, dice relación con los modelos de asignación a la red. En ellos, estas funciones son necesarias para los procesos de elección de ruta (mínimo costo generalizado de viaje) y para la estimación de los consumos de tiempos en arcos y totales de la red. En general, en los modelos de asignación usualmente utilizados en nuestro país, su proceso de equilibrio está basado en el algoritmo de Frank-Wolfe, el cual impone una serie de requisitos a la función. La función a considerar debe ser continua y diferenciable, y en el caso de una relación flujo-tiempo debe ser creciente y estrictamente convexa. Esta última restricción, impide utilizar el inverso de las funciones flujo-velocidad calibradas como funciones flujo tiempo ya que el resultados es una curva con tramos cóncavos y convexos. Es importante hacer notar que dicha restricción impone considerar una simplificación, ya que el fenómeno no tiene un comportamiento estrictamente convexo.

Debido a lo anterior, en este trabajo se desarrolló el caso de determinar funciones flujo-tiempo para ser incorporadas en EstraSur³. Dado el carácter de EstraSur (modelo estratégico), donde los períodos de análisis son agregados, las funciones obtenidas son válidas para flujos simétricos (partición 50%-50%), con el fin de lograr la mayor precisión posible para dicha situación. Para esto se determinó una nueva formulación (Ecuación 4), la cual se calibra sobre la base de los datos obtenidos por simulación y considerando los factores de equivalencia estimados para las relaciones flujo-velocidad, manteniendo la categorización de caminos y tipología de vehículos definida.

³ EstraSur es el modelo estratégico de transporte para la Macrozona Sur de nuestro país y que actualmente está en su fase final de desarrollo.

$$T_1 = ae^{bq_1} + \alpha + \mu q_1 \quad (4)$$

Nótese, que la Ecuación 4 sólo depende del flujo en la dirección en que se estima el tiempo de viaje (q_1) y donde a , b , α , μ y σ son parámetros. Además, dicha formulación es válida para todos los tipos de vehículo.

Como ejemplo, en la Figura N°8, se presenta un gráfico que muestra la curva flujo-tiempo para vehículos livianos, correspondiente a un camino de pendiente baja y recto (camino tipo 1).

Es importante hacer notar, que los modelos de asignación normalmente han utilizado funciones flujo-tiempo tipo BPR (Ecuación N°5), las cuales no se adaptan en buena forma a los datos obtenidos en este estudio, principalmente para flujos cercanos a la capacidad.

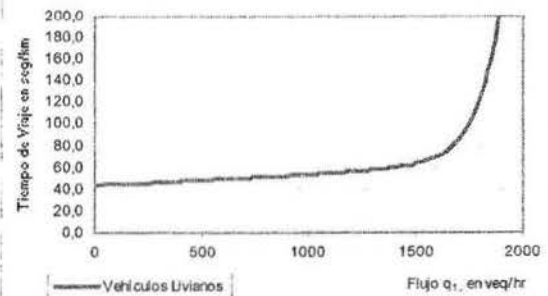


Figura N°8: Curva Flujo-Tiempo Vehículos Livianos

$$T_1 = t_0 + \alpha \cdot q^n \quad (5)$$

Esto motivó la búsqueda de esta nueva formulación, la cual arrojó buenos resultados, logrando ajustes con coeficientes de correlación (R^2) de 0,99 y errores medios entre 2,2 y 3,7 seg/km. En la Tabla N°4 se presentan los valores de los parámetros de las funciones por tipo de vehículo para cada categoría de camino definida.

6. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este estudio, se han dado pasos importantes en la determinación de velocidades y tiempos de viaje de los usuarios para la modelación de una red vial. Se desarrolló un detallado análisis del fenómeno de la velocidad de operación en función de los flujos vehiculares para caminos en calzada simple. En este estudio, se determinaron funciones flujo-velocidad que representan en detalle el fenómeno, para una amplia gama de configuraciones geométricas y operacionales. Además, en la estimación de factores de equivalencia asociados a las velocidades de operación y diferenciados por tipo de camino se logró un avance significativo es un hecho inédito, ya que anteriormente hubo algunos intentos sin llegar a buenos resultados.

Respecto de las relaciones flujo-tiempo para los modelos de EstraSur, cabe hacer notar que en este estudio se determinaron y calibraron funciones con formulaciones distintas a las tradicionales (tales como los BPR), las cuales a la luz de los resultados se ajustan en mejor forma al fenómeno, generando una nueva alternativa de función a utilizar en los modelos de asignación a redes viales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la valiosa cooperación en este trabajo del Ingeniero Sr. Jorge Amaya y a SECTRA por permitir su publicación.

REFERENCIAS

A.G. Ingeniería Ltda. (1998) Análisis y Desarrollo Evaluación Sistema de Transporte Interurbano, IX Etapa. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte.

Akcelik, R. (1995) Signal Timing Analysis for Vehicle-Actuated Control. Australian Road Research Board Ltd., Working Document N° WDTE 95/007, June 1995, pp 52. (ARRB: Vermont South, Vic.)

Álvarez, V (1998) Actualización del Modelo de Tráfico Interurbano TRARR. Memoria para la obtención del Título de Ingeniero Civil Universidad de Chile.

CDI (1992) Preinversión Mejoramiento Conexión Vial Santiago -Valparaíso. Estudio para la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

Luk, J.Y.K. and Hepburn, S (1995). Congestion Pricing: Fundamental Principles and Revenue Distribution. Research Report ARR 270. (ARRB Transport Research: Vermont Sth., Vic.)

Road & Transport Research (Junio 1996) Vol. 5, N°2, **Congestion Pricing**

Transportation Research Board, TRB (1992) Manual de Capacidad de Carreteras, Special Reports N°209, Second Edition, National Research Council, Washington D.C.

TRASA (1995) Estudio de Demanda Concesión Camino La Dormida. Estudio para el Ministerio de Obras Públicas.

Universidad de Chile (1990) Validación y Complementación de Costos Operacionales en Caminos de Chile. Estudio realizado para la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

Tabla N°1: Categorización de Caminos Tipo y Rango de Valores Geométricos

Variable	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
Pendiente (%)	P≤2	P≤2	P≤2	P≤2	2<P≤3	2<P≤3	2<P≤3	2<P≤3	P>3	P>3	P>3	P>3
Curvatura (°/km)	C≤30	30<C≤70	70<C≤120	C>120	C≤30	30<C≤70	70<C≤120	C>120	C≤30	30<C≤70	70<C≤120	C>120

Tabla N°2: Parámetros Función Flujo-Velocidad Vehículos Livianos

Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	33,90	29,97	24,14	21,04	36,61	31,70	25,03	21,28	35,85	31,18	26,92	21,83
b	0,00072	0,00097	0,00210	0,00200	0,00078	0,00099	0,00210	0,00213	0,00100	0,00169	0,00210	0,00193
β_1	49,69	47,86	42,78	37,28	48,68	46,91	42,50	37,24	43,18	43,52	40,12	35,72
μ_1	1969,7	1859,1	1818,4	1637,3	1969,6	1847,4	1818,1	1624,9	1970,3	1808,7	1809,2	1626,7
σ_1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
β_2	15,76	10,97	17,10	16,80	11,42	13,67	15,25	15,90	21,16	16,25	16,74	16,96
μ_2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
σ_2	290,1	163,5	2013,1	1644,9	188,2	73,0	2529,8	1660,5	615,6	1571,0	1593,7	1268,2
Error (km/hr)	1,64	2,04	1,97	1,75	1,86	2,22	2,11	1,93	2,74	2,54	2,28	2,15
R ²	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Factores de Equivalencia												
C. Articulado	2,5	2,95	4,05	5	2,5	2,95	4,05	5	2,5	3	4,05	5,1
C. Simple	1,7	1,85	2,55	3,5	1,7	1,85	2,55	3,5	1,7	1,85	2,55	3,5
Buses	1,6	1,7	2,4	3,4	1,6	1,7	2,4	3,4	1,6	1,7	2,4	3,4

Tabla N°3: Parámetros Función Flujo-Velocidad Vehículos Pesados

Camiones Simples												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	84,92	95,30	101,15	93,85	75,65	84,10	91,84	89,45	72,18	77,31	85,64	94,93
b	0,01320	0,01160	0,01118	0,01232	0,01470	0,01321	0,01242	0,01304	0,01347	0,01437	0,01320	0,01197
c	-18,45	-13,09	-8,39	-5,66	-22,16	-15,66	-9,86	-6,04	-26,86	-16,24	-10,13	-5,19
μ	51,30	46,54	45,07	42,40	51,15	46,96	44,93	42,23	45,40	46,35	43,15	40,21
σ	9,33	7,68	5,28	3,14	10,33	8,45	5,67	3,02	15,48	9,12	6,45	3,63
γ	18,37	13,06	8,39	5,66	22,00	15,60	9,86	6,04	25,50	16,14	10,11	5,19
Error (km/hr)	2,02	1,78	1,77	1,90	1,92	1,70	1,73	1,85	2,17	1,79	2,04	1,98
R ²	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97
Camiones Articulados												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	64,79	59,04	48,36	41,91	59,13	56,61	47,09	41,23	54,77	51,55	41,34	38,25
b	0,01764	0,01957	0,02375	0,02697	0,01931	0,02042	0,02459	0,02737	0,02073	0,02191	0,02772	0,02911
c	-18,05	-15,09	-13,96	-12,28	-20,27	-15,53	-14,13	-12,21	-15,48	-14,32	-14,03	-12,06
μ	42,33	37,82	32,36	27,72	42,86	37,54	32,35	27,33	36,08	33,33	29,57	25,70
σ	6,35	4,71	3,85	3,44	7,41	5,04	3,91	3,36	5,08	4,39	3,54	3,31
γ	18,03	15,08	13,96	12,28	20,20	15,52	14,13	12,21	15,47	14,31	14,03	12,06
Error (km/hr)	1,88	1,74	1,62	1,58	1,80	1,64	1,49	1,47	2,50	1,65	1,51	1,42
R ²	0,98	0,98	0,97	0,96	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,97	0,97	0,96
Buses												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	389,26	313,76	286,38	251,34	408,11	314,15	284,99	253,02	513,79	314,24	290,40	253,07
b	0,00257	0,00214	0,00199	0,00165	0,00247	0,00199	0,00189	0,00183	0,00184	0,00197	0,00196	0,00189
c	-4,07	-30,18	-32,20	-39,32	-3,40	-33,78	-34,55	-34,35	-4,07	-33,96	-31,39	-34,28
μ	37,97	33,17	26,72	26,16	39,11	33,66	27,06	22,47	25,70	33,36	26,86	22,08
σ	5,65	15,83	13,32	13,44	4,91	15,97	13,42	11,81	5,42	16,66	13,55	12,90
γ	4,06	26,87	28,39	34,41	3,39	30,12	30,49	29,89	4,03	29,92	27,59	29,04
Error (km/hr)	1,93	1,74	1,73	1,74	1,93	1,78	1,78	1,68	2,24	2,11	2,05	1,80
R ²	0,99	0,99	0,98	0,97	0,99	0,99	0,98	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97

Tabla N°4: Parámetros Función Flujo-Tiempo por Tipo de Vehículo

Vehículos Livianos												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	1,08E-05	1,15E-05	1,14E-05	1,14E-05	1,07E-05	1,33E-05	1,14E-05	1,19E-05	1,01E-05	1,59E-05	1,12E-05	1,20E-05
b	0,00870	0,00920	0,00940	0,01040	0,00870	0,00923	0,00940	0,01050	0,00872	0,00928	0,00950	0,01049
α	43,00	47,35	52,81	58,45	43,43	47,92	53,36	59,50	43,73	48,90	53,75	60,53
μ	0,00890	0,01173	0,01481	0,01865	0,00942	0,01172	0,01480	0,01843	0,01405	0,01384	0,01757	0,01924
Error (seg/km)	2,21	2,16	2,34	2,70	2,39	2,38	2,62	3,11	2,77	3,14	2,87	3,50
R ²	0,999	0,999	0,998	0,998	0,999	0,998	0,998	0,997	0,998	0,997	0,998	0,996
Camiones Simples												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	1,08E-05	1,15E-05	1,14E-05	1,14E-05	1,07E-05	1,33E-05	1,14E-05	1,19E-05	1,01E-05	1,59E-05	1,12E-05	1,20E-05
b	0,00870	0,00920	0,00940	0,01040	0,00870	0,00923	0,00940	0,01050	0,00872	0,00928	0,00950	0,01049
α	48,31	52,28	57,36	65,00	48,51	52,85	57,66	65,67	50,11	54,56	58,98	66,69
μ	0,00528	0,00802	0,01151	0,01373	0,00572	0,00786	0,01160	0,01370	0,01023	0,00985	0,01433	0,01550
Error (km/hr)	2,03	2,47	2,92	3,48	2,10	2,56	3,10	3,70	3,08	3,34	3,62	4,14
R ²	0,999	0,998	0,998	0,996	0,999	0,998	0,997	0,996	0,997	0,997	0,996	0,995
Camiones Articulados												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	1,08E-05	1,15E-05	1,14E-05	1,14E-05	1,07E-05	1,33E-05	1,14E-05	1,19E-05	1,01E-05	1,59E-05	1,12E-05	1,20E-05
b	0,00870	0,00920	0,00940	0,01040	0,00870	0,00923	0,00940	0,01050	0,00872	0,00928	0,00950	0,01049
α	53,47	60,21	68,94	78,85	54,00	61,26	69,58	80,15	60,09	66,77	74,28	83,77
μ	0,00245	0,00339	0,00443	0,00524	0,00269	0,00290	0,00427	0,00468	0,00452	0,00249	0,00476	0,00473
Error (km/hr)	1,80	1,74	2,06	2,77	1,79	1,69	2,05	2,80	2,62	2,31	2,33	3,05
R ²	0,999	0,999	0,999	0,997	0,999	0,999	0,999	0,997	0,998	0,998	0,998	0,997
Buses												
Coefficientes	Cam. 1	Cam. 2	Cam. 3	Cam. 4	Cam. 5	Cam. 6	Cam. 7	Cam. 8	Cam. 9	Cam. 10	Cam. 11	Cam. 12
a	1,08E-05	1,15E-05	1,14E-05	1,14E-05	1,07E-05	1,33E-05	1,14E-05	1,19E-05	1,01E-05	1,59E-05	1,12E-05	1,20E-05
b	0,00870	0,00920	0,00940	0,01040	0,00870	0,00923	0,00940	0,01050	0,00872	0,00928	0,00950	0,01049
α	45,87	49,85	56,93	65,37	46,16	50,54	57,36	65,86	48,07	51,67	57,62	66,15
μ	0,00723	0,00910	0,01037	0,01126	0,00764	0,00881	0,01041	0,01136	0,01198	0,01142	0,01417	0,01389
Error (km/hr)	2,27	2,30	2,53	3,09	2,37	2,38	2,76	3,23	3,17	3,32	3,16	3,76
R ²	0,999	0,999	0,998	0,997	0,999	0,998	0,998	0,997	0,997	0,997	0,997	0,996