

# Modelación de operación en carreteras argentinas y recomendaciones de ajustes al Manual de Capacidad HCM 2010

Marcelo O. Maldonado<sup>1</sup>, Marcelo Herz<sup>2</sup> e Jorge Galarraga<sup>3</sup>

**Resumen:** El Manual de Capacidad HCM de los EEUU constituye el documento principal para el análisis operacional de carreteras bidireccionales en Argentina. La aparición de la versión del Manual de Capacidad HCM 2010 (TRB, 2010) introduce modificaciones relevantes abandonando la metodología de análisis bidireccional y ampliando el alcance de situaciones contempladas en la operación de carreteras. No obstante, utiliza parámetros que no se han verificado para las condiciones locales, principalmente en lo que se refiere a comportamiento de conductores y características de parque automotor, lo cual puede derivar en diferencias que afecten decisiones de obras de aumento de capacidad basadas en un análisis inadecuado. A partir de estudios de campo y la utilización de un modelo de simulación microscópico, se proponen nuevos modelos de relación entre variables fundamentales velocidad – flujo y porcentaje de tiempo en seguimiento – flujo, así como nuevos valores de factores de ajuste por tipo de terreno y presencia de vehículos pesados. Con estos nuevos modelos y factores de ajuste se establecen una serie de recomendaciones para la aplicación de la metodología propuesta en el HCM 2010 adaptada a rutas de Argentina. [DOI:10.4237/transportes.v20i3.556](https://doi.org/10.4237/transportes.v20i3.556).

*Palabras-chave:* carreteras, modelación, simulación, HCM.

**Abstract:** The U.S.A. Highway Capacity Manual (HCM) is the main document used for operational analysis of two-lane Highways in Argentina. The new version HCM 2010 (TRB, 2010), introduces significant modifications leaving the two-way analysis methodology and expanding the scope of situations covered in the operation of roads. However uses parameters that have not been tested for local conditions, particularly in regard to drivers behavior and vehicle fleet characteristics, which can lead to differences that may lead to inadequate analysis for capacity-building decision-making. From field studies and the use of a microscopic simulation model, the study proposes new models for fundamental relationship between speed - flow and percent time spent following – flow. As well as new values for adjustment factors related to type of terrain and heavy vehicles. These new models and adjustment factors lead to recommendations for the implementation of HCM 2010 methodology adapted to Argentinean two-lane highways.

*Keywords:* two-lane highways, modeling, simulation, HCM.

## 1. INTRODUCCION

Las carreteras, o rutas convencionales bidireccionales representan el mayor porcentaje de kilómetros dentro de la red vial de Argentina. Los aumentos de tránsito, sumado a los condicionantes geométricos y de percepción de los conductores, llevan a que muchas de ellas operen con bajos niveles de servicio y en la actualidad crecientes longitudes de carreteras troncales argentinas están mostrando demandas de carriles de sobrepaso o de ampliación a cuatro carriles.

El Highway Capacity Manual (HCM) de los EEUU fue adoptado en Argentina incorporando los criterios de Nivel de Servicio en las primeras Normas de Diseño Geométrico de Caminos Rurales (DNV, 1967) y constituye la referencia principal para el análisis operacional de carreteras en Argentina. El HCM 2010 (TRB, 2010) presenta como principales modificaciones respecto a la anterior versión HCM 2000 (TRB,2000) la inclusión del modo bicicleta además del modo automotor, la inclusión de una Clase III de carre-

teras en zonas con moderado desarrollo urbano, además de las clases I y II en zonas rurales, y el abandono del clásico análisis conjunto de ambos carriles dejando exclusivamente el análisis direccional. Sin embargo, esta metodología unidireccional no ha sido verificada localmente respecto a las condiciones del parque y del comportamiento de los conductores. Esta situación puede derivar en diferencias entre las medidas de performance obtenidas de la aplicación directa de la metodología y las reales, y producir diagnósticos inadecuados para la toma de decisiones de obras de aumento de capacidad. Ante esto, se estableció la conveniencia de poder modelar la operación de carreteras argentinas como base para establecer recomendaciones para la aplicación de la metodología propuesta en el HCM 2010, caracterizando las variables relacionadas al tránsito y la geometría y la influencia de estas en la determinación de las medidas de efectividad propuestas para la determinación del Nivel de Servicio (NS).

En la mayoría de los países del mundo el análisis operacional de carreteras está basado en la metodología del HCM, no obstante los estudios e investigaciones orientados a adaptar los procedimientos a las condiciones locales han llevado a plantear metodologías alternativas como es el caso de Sudáfrica donde se proponen nuevas medidas de eficacia y la aplicación de modelos macroscópicos (Van As *et al.*, 2004, Van As, 2007). En España, (Romana, 2007) se presenta una manera alternativa planteando la definición de una velocidad umbral ( $V_u$ ) basada en la expectativa de los usuarios. Estudios realizados en Brasil (Bessa Jr., 2009) utilizando una metodología similar a la de este trabajo, pre-

<sup>1</sup> **Marcelo O. Maldonado**, Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Transporte Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. (e-mail: [marcelomaltonado@arnet.com.ar](mailto:marcelomaltonado@arnet.com.ar)).

<sup>2</sup> **Marcelo Herz**, Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Transporte Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. (e-mail: [mherz@efn.uncor.edu](mailto:mherz@efn.uncor.edu)).

<sup>3</sup> **Jorge Galarraga**, Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Transporte Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. (e-mail: [jorgala@efn.uncor.edu](mailto:jorgala@efn.uncor.edu)).

senta modelos particulares para las relaciones fundamentales flujo - velocidad y flujo - porcentaje de tiempo en seguimiento.

En cuanto a la metodología del HCM, a partir de la publicación de la versión HCM 2000 surgieron diferentes estudios cuestionando las ecuaciones y resultados, principalmente las diferencias observadas entre el análisis conjunto de ambos carriles y el análisis direccional (Luttinen, 2001). En respuesta a esta situación, en el marco del Proyecto 20-7 del National Cooperative Highway Research Program, se realizaron estudios adicionales sobre los parámetros del procedimiento unidireccional (TRB, 2003) que dieron origen a importantes correcciones al HCM 2000 resultando en un nuevo procedimiento incorporado en la Adenda de Correcciones Aprobadas al HCM 2000 (TRB, 2007), así como en la edición HCM 2010.

Desde el HCM 2000 la clasificación de carreteras para la determinación del Nivel de Servicio (NS) estaba caracterizada en arteriales (Clase I) con alta expectativa de movilidad, y colectoras (Clase II) con expectativas más moderadas, siempre en zonas rurales. Se agrega en el HCM 2010 la clase III, para zonas suburbanas y travesías urbanas en tanto operen con flujo ininterrumpido, o sea sin intersecciones semaforizadas. Para el caso de las carreteras Clase I, donde se prioriza la movilidad, el NS se determina con dos medidas de desempeño: la velocidad media de viaje direccional ( $ATS_d$ ) y el porcentaje de tiempo en seguimiento direccional ( $PTSF_d$ ). En carreteras Clase II, donde se prioriza la función de accesibilidad, se considera solamente el  $PTSF_d$ , con un umbral algo más conservador debido a que en este caso se supone que las expectativas de los conductores son menores que en las carreteras Clase I. Para el caso de carreteras Clase III se propone como medida de efectividad el porcentaje de velocidad de flujo libre (PFFS), que resulta de la relación porcentual entre la velocidad media de viaje direccional ( $ATS_d$ ) y la velocidad de flujo libre direccional ( $FFS_d$ ), influida por límites de velocidad señalizados.

El estudio está orientado a determinar  $ATS_d$  y  $PTSF_d$  en condiciones locales. En base al entorno de simulaciones realizadas con el modelo calibrado, el estudio realizado puede aplicarse para velocidades de flujo libre superiores a 90 Km/h, fuera de travesías urbanas, a tramos generales extensos en terrenos llanos a ondulados y sin restricciones de sobrepaso, características usuales en las zonas de mayor desarrollo del territorio argentino. En consecuencia, bajo las citadas limitaciones, puede emplearse para estimar el NS para carreteras Clase I y Clase II. Los parámetros y límites adoptados por el HCM 2010 para definir el NS no estuvieron en estudio, solamente su obtención para las condiciones locales.

## 2. ESTUDIOS LOCALES SOBRE OPERACIÓN DE CARRETERAS

### 2.1. Antecedentes

Se han analizado antecedentes a los fines de destacar las diferencias principales entre Argentina y los Estados Unidos en lo que respecta a parque vehicular, comportamiento de los conductores y estructura y funcionalidad de la red vial.

En cuanto a parque automotor, los estudios e investigaciones relacionados muestran menores performance de los vehículos pesados en rutas locales y su influencia en la operación de carreteras (Galarraga *et al.*, 1990, 1991). Debido a que se trata de estudios que datan ya de unos 20 años se considera que en la actualidad, a partir de los cambios en las logísticas comerciales y el incremento de participación del transporte de carga general, las diferencias entre la relación peso/potencia de camiones utilizados en ambos países no serían tan significativas. En lo referente al comportamiento de los conductores, los estudios afirman que los conductores argentinos presentan características más agresivas respecto de los norteamericanos (Galarraga *et al.*, 2001, Caimi, 2007).

Mientras que en EEUU la mayor parte de la distribución de bienes y servicios y principalmente los de larga distancia se concentran sobre una red de autopistas que representan el 30% del sistema vial nacional (FHWA, 2006), en nuestro país las rutas con configuración de autopistas no alcanzan el 5% de la red vial principal nacional y las mismas se concentran en sectores más urbanizados, sin conformar una red que articule el territorio.

Finalmente se revisaron algunas investigaciones y estudios realizados relacionados al análisis de capacidad y nivel de servicio en carreteras en el medio local (Baruzzi *et al.*, 2009), en donde, más allá de las limitaciones planteadas en cada caso, las conclusiones reflejan la necesidad de ampliar estudios a los fines de contar con metodologías confiables para la evaluación de operación de carreteras argentinas.

### 2.2. Estudios de campo

Se realizaron relevamientos en tres carreteras en tramos entre 5 y 9 km de longitud ubicados en la Provincia de Córdoba. Se optó por esta localización por tratarse de rutas en entorno rural con valores altos de Tránsito Medio Diario Anual (TMDA) y con características particulares de tránsito y topografía.

Se relevó toda la información necesaria de tránsito y geometría de la vía para poder analizar la operación de los tramos de carretera con la metodología del HCM 2010 y para la carga de información del modelo de simulación.

En la Tabla 1 se presenta información resumida de los sitios seleccionados indicando la ruta de pertenencia, la longitud del tramo en donde se realizaron las mediciones así como otros datos de geometría y tránsito.

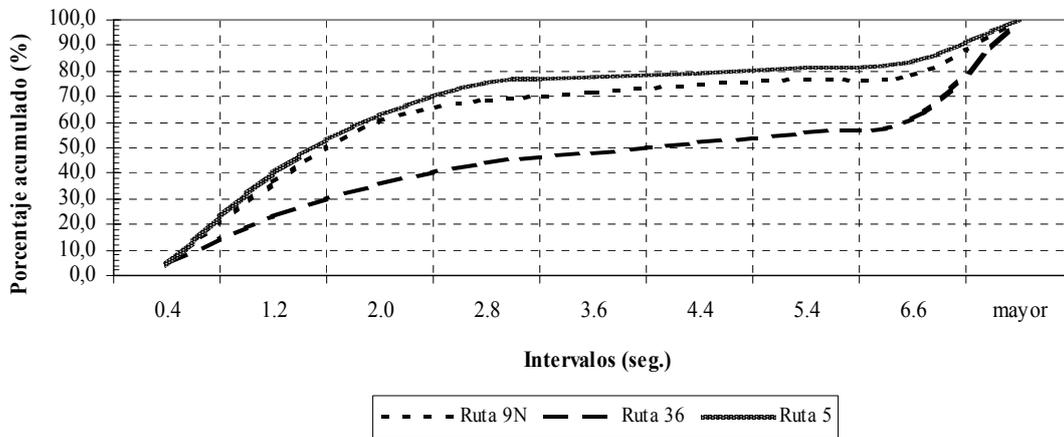
Para el relevamiento de tránsito, además de conteos manuales se utilizó un contador y clasificador portátil, realizándose en cada sitio mediciones de 60-75 minutos en días y horarios de bajo y alto flujo de tránsito. En Tabla 2 se presentan resultados de las mediciones de tránsito total en vehículos por hora (v/h) y velocidades, incluyendo la última columna mediciones de velocidad media de viaje ob-

Tabla 1. Información general sobre los sitios seleccionados para los estudios de campo

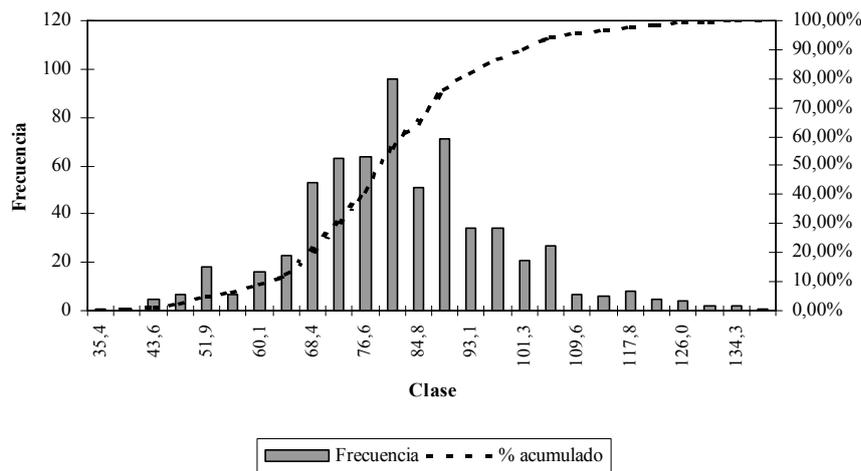
Ruta	Tramo Entre	Longitud (km)	TMDA	% Camiones	Pendiente Media	% Sin sobrepaso
Ruta Provincial N°5	km 12 y 17	5,0	9800	10%	0,9%	69%
Ruta Nacional N° 36	km 785 y 794	9,0	8300	24%	0,5%	30%
Ruta Nacional N° 9N	km 737 y 742	5,0	9200	27%	0,4%	37%

**Tabla 2.** Mediciones de tránsito y velocidad en sitios seleccionados

<i>Sitio</i>	<i>Volumen Direccional (v/h)</i>	<i>Volumen Opuesto (v/h)</i>	<i>Camiones (%)</i>	<i>Velocidad Flujo Libre (km/h)</i>	<i>Velocidad Puntual (km/h)</i>	<i>Velocidad Media de Viaje (km/h)</i>
Ruta 5	654	235	4	96,5	80,1	88,3
Ruta 36	298	230	20	106,5	95,1	90,7
Ruta 9 N	552	315	18	95,0	85,7	82,1



**Figura 1.** Distribución de intervalos medidos en sitios seleccionados



**Figura 2.** Distribución de velocidades puntuales medidas en puesto Ruta 5

tenida mediante técnicas de observación con el método de chapa patente.

En la Figura 1 se muestra la distribución acumulada de intervalos medidos en campo, variable que resultó de gran relevancia para la calibración del modelo de simulación y, a modo de ejemplo, en la Figura 2 se muestra información estadística de mediciones de velocidad puntual en el puesto de medición de Ruta 5. Un mayor detalle de mediciones realizadas y resultados se puede consultar en Maldonado

(2010).

### 2.3. Comparación de mediciones en campo con aplicación directa del HCM 2010

Las mediciones de distribución de intervalos permitieron establecer los porcentajes de vehículos viajando a intervalos menores a tres segundos ( $PTSF_d$ ) y mediante censos de chapa patente se establecieron las velocidades medias de viaje ( $ATS_d$ ). Se realizó la comparación de los resultados obtenidos con la aplicación del HCM 2010 y con los valo-

**Tabla 3.** Comparativa de Mediciones en campo con aplicación directa del HCM 2010

<i>Sitio</i>	<i>PTSF (interv. &lt; 3 seg.)</i>			<i>ATS (km/h)z</i>			<i>NS</i>	
	<i>Campo</i>	<i>HCM</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Campo</i>	<i>HCM</i>	<i>Diferencia</i>	<i>Campo</i>	<i>HCM</i>
Ruta 5	75,1	77,8	2,7	88,3	79,6	-8,7	D	D
Ruta 36	44,2	55,4	11,2	90,7	95,5	4,8	B	C
Ruta 9 N	69,0	71,0	2,0	82,1	80,1	-2,0	D	D

res medidos en campo cuyos resultados se muestran en Tabla 3. Se detectaron en general diferencias bajas, modificándose el NS en un solo caso. Como se puede observar, los valores medidos de  $PTSF_d$  resultaron algo menores a los obtenidos con la aplicación directa de la metodología del HCM 2010, lo que resulta acorde a resultados obtenidos en otros estudios locales (Baruzzi *et al.*, 2009). En cuanto a las mediciones de  $ATS_d$  los valores medidos en campo se encuentran tanto por encima como por debajo de los obtenidos con la aplicación de la metodología del HCM 2010.

#### 2.4. Calibración del modelo de simulación

Inicialmente se probó el modelo de simulación TWOPAS aplicado para la metodología del HCM (Harwood *et al.*, 1999), pero se encontraron limitaciones por ser una aplicación bajo plataforma DOS. Se analizaron otras opciones como el programa IHSDM de la FHWA de Estados Unidos, que posee un módulo de análisis de tráfico que incorpora el modelo TWOPAS. Posteriormente se pudo utilizar la versión 6.2 del programa TSIS – CORSIM que incorpora la posibilidad de modelar carreteras bidireccionales (McTrans, 2010).

El proceso de calibración se basó en un primer análisis de sensibilidad de las variables de simulación consideradas en el programa, y luego se asignaron progresivamente valores a aquellas más relevantes, que resultaron ser el Factor de seguimiento (registro 68), el Porcentaje de distribución

de velocidades (registro 147) y la Distribución del parque automotor (registro 71).

Para la comparativa de los resultados obtenidos del modelo y de los estudios de campo se tuvieron en cuenta la distribución de intervalos, el porcentaje de vehículos viajando a intervalos menores a tres (3) segundos o en pelotón, la velocidad media de recorrido promedio del total de tránsito del tramo y la velocidad puntual promedio del total de vehículos censados en el puesto de medición.

Un aspecto crítico de la calibración resultó el Factor de sensibilidad de seguimiento. Si bien a priori, la mayor agresividad del conductor local debería reflejarse en valores menores de este factor, los mejores ajustes se alcanzaron para valores mayores a los de defecto del programa. La consideración de valores por defecto o menores mostró, para el caso de altos volúmenes de tránsito, distribuciones de intervalos tales que implicarían que no se estaría alcanzando la capacidad de la ruta aún para tránsitos de 1700 vehículos por hora sentido, lo cual no se refleja en la realidad.

Con el modelo calibrado se alcanzaron muy buenos ajustes para las distintas variables. En el caso de la distribución de intervalos se compararon las curvas de distribución obtenidas del modelo calibrado con las medidas en campo, obteniendo formas muy similares, tal como se muestra en las Figuras 3 a 5.

En cuanto a las otras medidas de eficacia consideradas, los resultados se muestran en la Tabla 4. Para el porcentaje de vehículos en pelotón (PP), las diferencias fueron del

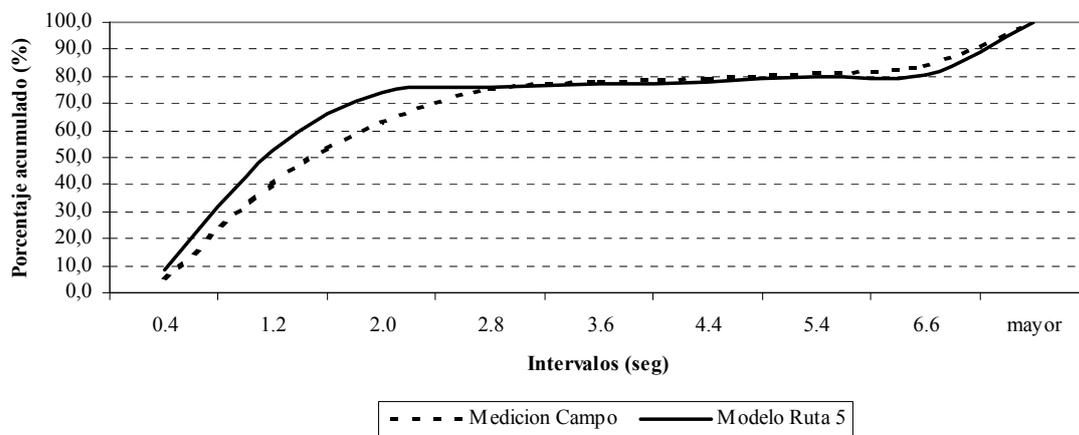


Figura 3. Comparativa de distribución de intervalos medidos en campo y obtenidos con el modelo de simulación calibrado. Ruta 5

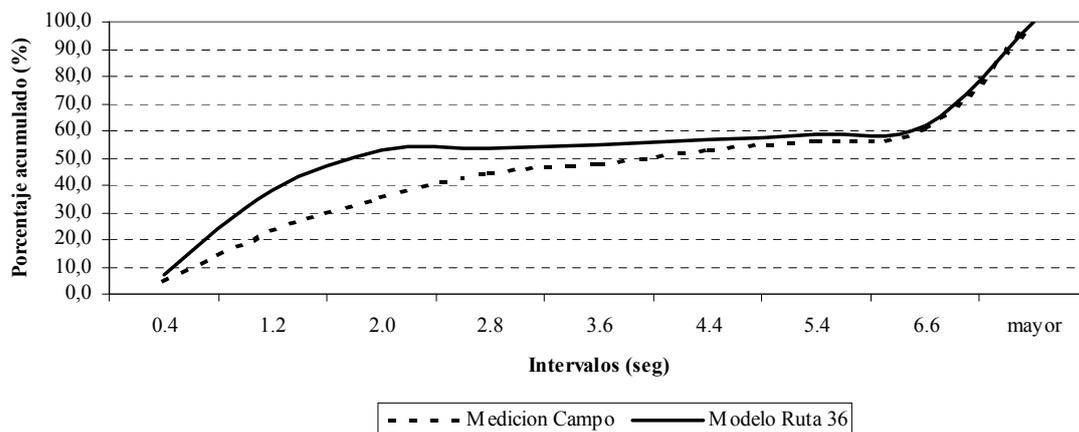


Figura 4. Comparativa de distribución de intervalos medidos en campo y obtenidos con el modelo de simulación calibrado. Ruta 36

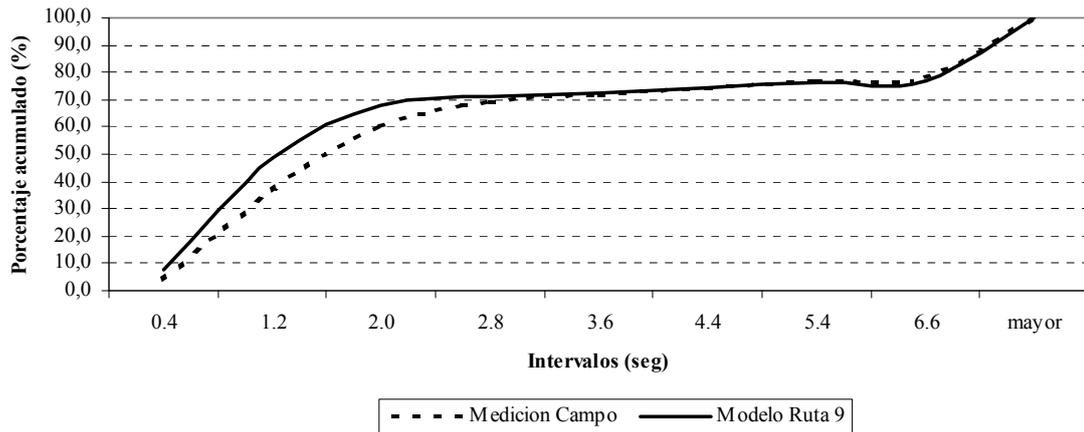


Figura 5. Comparativa de distribución de intervalos medidos en campo y obtenidos con el modelo de simulación calibrado. Ruta 9N

Tabla 4. Comparativa entre valores de medida de eficacia medidas en campo y con el modelo calibrado

Sitio	Porcentaje en Pelotón (Intervalos < 3seg.)			Velocidad media de viaje (km/h)			Velocidad puntual (km/h)		
	Modelo	Campo	Diferencia	Modelo	Campo	Diferencia	Modelo	Campo	Diferencia
Ruta 5	75,8	75,1	0,7	88,3	84,8	3,5	80,1	82,2	-2,1
Ruta 36	53,7	44,2	9,5	90,7	97,4	-6,7	95,1	95,9	-0,8
Ruta 9 N	71,1	69,0	2,1	82,1	86,0	-3,9	85,7	84,9	0,8

4,1% en promedio, siendo levemente mayores los resultados del modelo y al comparar tanto velocidades medias de recorrido como velocidad puntual en el puesto de medición, las diferencias máximas entre valores del modelo y medidos en campo fueron de -6,7 y -2,1 km/h respectivamente (Maldonado, 2010).

### 3. MODELACIÓN DE OPERACIÓN EN CARRETERAS ARGENTINAS

El modelo de simulación calibrado se aplicó para el análisis de relaciones fundamentales velocidad-flujo y para determinar medidas de desempeño representativas del flujo en carreteras locales. El análisis de las relaciones fundamentales de operación y de los factores de ajuste para determinar la demanda de tránsito equivalente se realizó con procedimientos similares a los empleados en los estudios de base para definir la metodología del Manual HCM (Harwood *et al.*, 1999).

El manual HCM plantea como base de la metodología el análisis de las relaciones fundamentales en condiciones básicas, es decir en ausencia de restricciones geométricas, de tránsito y ambientales (TRB, 2010). Sobre esta base, se realizó el análisis de las relaciones entre las variables fundamentales de flujo, velocidad y porcentaje de tiempo en seguimiento, a partir del análisis con técnicas de regresión de los resultados de las simulaciones microscópicas para distintas condiciones de tránsito. También mediante el análisis de los resultados de la simulación se definieron nuevos valores de factores de ajuste para la determinación del tránsito equivalente.

#### 3.1. Relaciones Velocidad - Flujo

De acuerdo al HCM 2010 la velocidad media de viaje direccional ( $ATS_d$ ) se determina a partir de la ecuación (1):

$$ATS_d = FFS - 0,00776(v_{d,ATS} + v_{o,ATS}) - f_{np,ATS} \quad (1)$$

en donde,

$ATS_d$ : velocidad media de viaje direccional (mi/h);

$FFS$ : velocidad de flujo libre (mi/h);

$v_{d,ATS}$ : tasa de flujo equivalente en la dirección de análisis (ve/h);

$v_{o,ATS}$ : tasa de flujo de equivalente en la dirección opuesta (ve/h); e

$f_{np,ATS}$ : factor de ajuste por porcentaje de zonas de no sobrepaso en la dirección analizada (mi/h).

Para encontrar la relación en condiciones locales se realizó el análisis empleando el modelo de simulación calibrado. Se analizaron los resultados de distintas combinaciones de flujos de tránsito de vehículos livianos equivalentes por hora (ve/h) (entre 100 y 1700 ve/h direccionales y opuestos) y velocidades de flujo libre (90, 100 y 110 km/h). Se realizaron cinco (5) corridas del modelo con lo cual el número total resultó de  $10 \times 10 \times 3 \times 5$ , es decir 1500 corridas, de donde se obtuvieron resultados como los mostrados en la Figura 5 para el caso de velocidad de flujo libre de 110 km/h en donde se presenta la comparativa con los valores que corresponden con la aplicación directa de la metodología del HCM 2010. De la observación de la Figura 6 surge que los resultados obtenidos con la aplicación del modelo muestran rangos menores, lo que implicaría una menor influencia del tránsito opuesto en la determinación de la velocidad media de viaje en la dirección analizada.

Otra diferencia observada al comparar gráficos para distintas velocidades de flujo libre es que las pendientes de las rectas obtenidas con la aplicación del HCM 2010 se mantienen constantes mas allá de la velocidad de flujo libre que se considere. Esto a priori puede no resultar del todo cierto ya que es de suponer que para altos flujos de tránsito la velocidad de circulación se encuentra más condicionada por la alta interferencia de los vehículos y ya no debería estar tan influenciada por la velocidad de flujo libre de la ruta.

A partir de los resultados obtenidos de la simulación, el

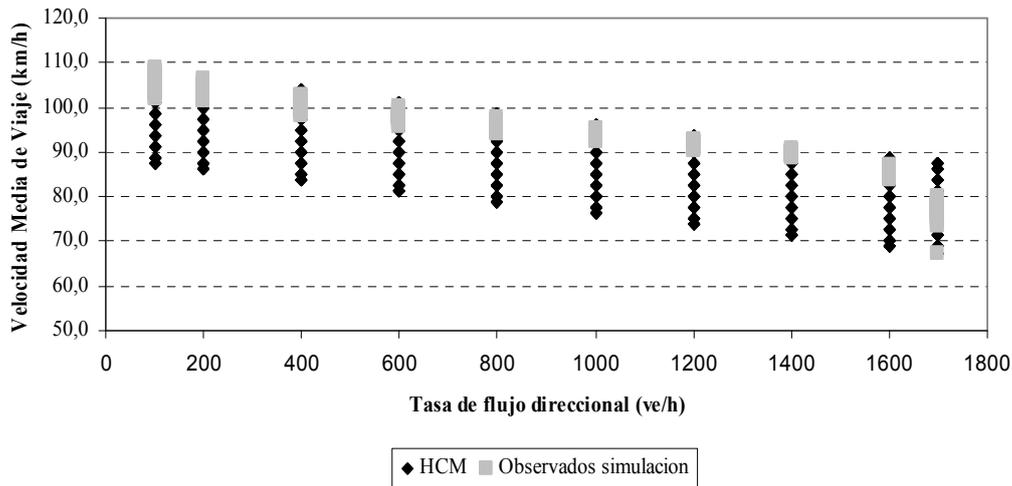


Figura 6. Relación Velocidad – Flujo direccional obtenida para FFS =110 km/h

paso siguiente consistió en la obtención mediante análisis de regresión de una función que represente la relación entre flujo y velocidad. Se planteó un modelo de tipo lineal con dos variables independientes (flujo direccional y opuesto) y un modelo cóncavo, que es el utilizado en el manual de capacidad alemán (Bessa Jr., 2009). Los modelos matemáticos considerados corresponden a la forma de las ecuaciones 2 y 3.

$$ATS_d = FFS + b \cdot v_d + c \cdot v_o \quad (2)$$

$$ATS_d = FFS + b \cdot \sqrt{v_d} + c \cdot \sqrt{v_o} \quad (3)$$

en donde,

- $ATS_d$ : velocidad media de viaje para el flujo direccional (km/h);
- $FFS$ : velocidad de flujo libre;
- $b$  y  $c$ : parámetros de regresión;
- $v_d$ : tasa de flujo en vehículos livianos equivalentes en

la dirección analizada (ve/h); e

$v_o$ : tasa de flujo en vehículos livianos equivalentes en la dirección opuesta (ve/h).

Los resultados obtenidos mostraron un buen ajuste con ambos modelos, no obstante con el modelo cóncavo se observó una tendencia a sobrestimar los valores de velocidad media para el caso de flujos de tránsito altos y para cada valor de flujo direccional un rango de variación menor lo que implicaría una menor influencia del tránsito opuesto en la determinación de la velocidad media de viaje. De esta manera se adoptó el modelo relacional lineal, con los coeficientes correspondientes a la ecuación 2 que se muestran en la Tabla 5, donde se puede observar muy buenos ajustes al observar los valores de estadísticos t de cada variable y del coeficiente de ajuste de regresión  $R^2$ . A diferencia con el modelo propuesto por el HCM, presenta coeficientes distintos para el volumen direccional y para el volumen opuesto, y las curvas para las distintas velocidades de flujo libre no

Tabla 5. Modelo lineal para la relación Velocidad-Flujo direccional

FFS (km/h)	Parámetro b		Parámetro c		$R^2$
	Valor	Est. t	Valor	Est. t	
110	-0,016	-92,9	-0,002	-10,4	0,893
100	-0,013	-105,9	-0,002	-17,1	0,907
90	-0,011	-103,1	-0,002	-19,5	0,895

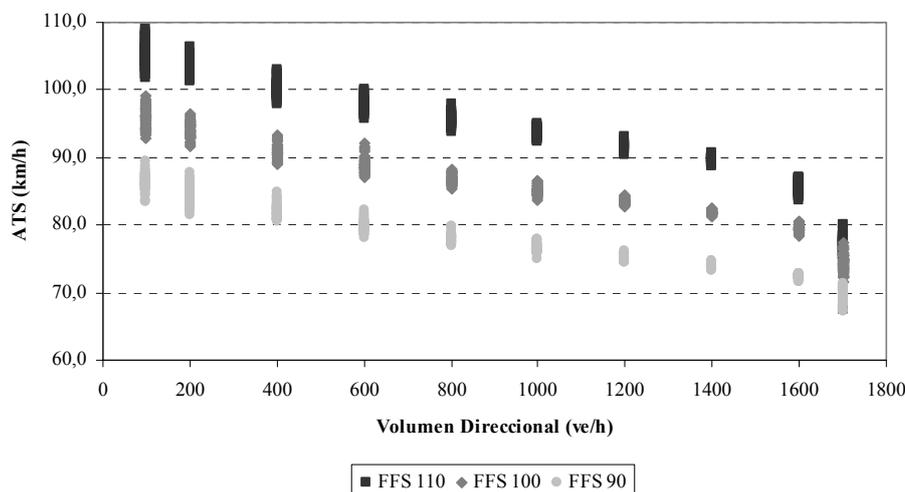


Figura 7.  $ATS_d$  – Flujo direccional para FFS = 110 – 100 y 90 km/h

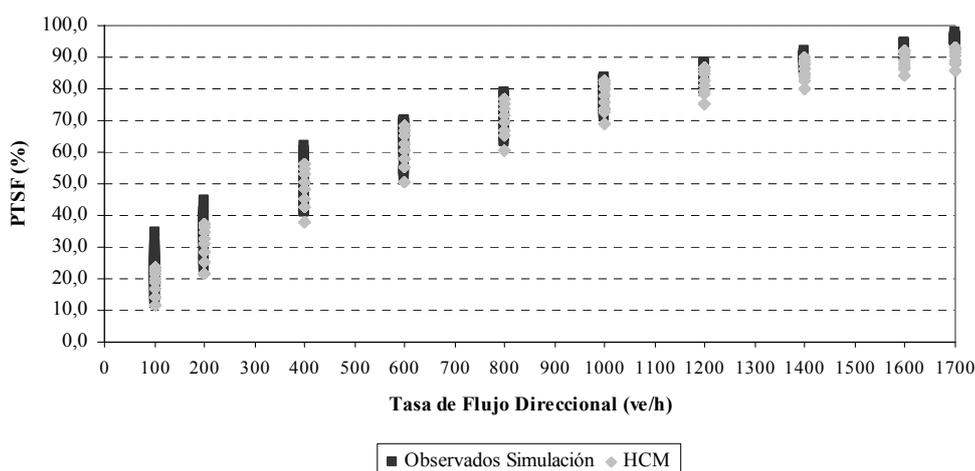


Figura 8. Relación PTSFd – Flujo direccional obtenida de la simulación

resultan paralelas, lo cual se considera más próximo a la realidad ya que para el caso de flujos altos, disminuye la influencia de la velocidad de flujo libre en la velocidad de operación.

En la Figura 7 se presentan las curvas propuestas que resultan de la consideración del modelo lineal para la relación Velocidad – Flujo en el análisis direccional.

### 3.2. Relaciones Porcentaje de tiempo en seguimiento – Flujo

De acuerdo al HCM 2010, el porcentaje de tiempo en seguimiento se determina en función de un porcentaje base que depende de las tasas de flujo de demanda direccional y de un factor de ajuste por porcentaje de zonas de no sobrepaso en la dirección analizada según la ecuación (4).

$$PTSF_d = BPTSF_d + f_{np,PTSF} \left( \frac{v_{d,PTSF}}{v_{d,PTSF} + v_{o,PTSF}} \right) \quad (4)$$

en donde,

$PTSF_d$ : Porcentaje de tiempo en seguimiento direccional;  
 $BPTSF_d$ : Porcentaje de tiempo en seguimiento base direccional;

$v_{d,PTSF}$ : Tasa de flujo equivalente en la dirección de análisis (ve/h);

$v_{o,PTSF}$ : Tasa de flujo de equivalente en la dirección opuesta (ve/h); e

$f_{np,PTSF}$ : Factor de ajuste por porcentaje de zonas de no sobrepaso en la dirección analizada (porcentaje).

Para encontrar la relación en condiciones locales se rea-

lizó el análisis empleando el modelo de simulación calibrado. Se analizaron los resultados de las mismas combinaciones que para el análisis de la relación Velocidad – Flujo, así como igual número de corridas para cada combinación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8, donde se presenta la comparación con valores obtenidos de la aplicación directa de la metodología del HCM 2010.

Inicialmente se planteó un modelo exponencial con la misma formulación que el propuesto en el HCM 2010, no obstante se detectaron importantes subestimaciones de valores principalmente para los casos de flujos altos y bajos, lo cual se acentuaba más para los casos de flujos opuestos bajos. Se propuso entonces un modelo exponencial con otra formulación que permitió un mejor ajuste, con nuevas curvas adaptadas de relación PTSF vs flujo direccional. El modelo propuesto se muestra en la ecuación 5 y los coeficientes para los distintos valores de flujos opuestos se muestran en la Tabla 6, en donde se observan valores de los estadísticos t de los parámetros y valores de los coeficientes de regresión que muestran un muy buen ajuste.

$$PTSF_d = v_d^a \exp(b - c \cdot v_d) \quad (5)$$

en donde,

$PTSF_d$ : porcentaje de tiempo en seguimiento en dirección analizada (%);

$v_d$ : tasa de flujo en vehículos livianos equivalentes en la dirección analizada (ve/h); e

$a, b$  y  $c$ : parámetros de la regresión.

De la aplicación del modelo surgen las nuevas curvas de relación  $PTSF_d$  – Flujo direccional en condiciones básicas

Tabla 6. Coeficientes de regresión del modelo exponencial propuesto para el cálculo del  $PTSF_d$  en condiciones básicas

Flujo Opuesto (ve/h)	a		b		c		R <sup>2</sup>
	Valor	Est. t	Valor	Est. t	Valor	Est. t	
100	0,7502	60,1	-0,6743	-9,4	0,00021	14,9	0,997
200	0,6896	58,2	-0,1809	-2,7	0,00024	16,9	0,996
400	0,6355	53,5	0,2463	3,7	0,00025	17,3	0,994
600	0,6398	61,8	0,2538	4,3	0,00027	21,5	0,995
800	0,6217	50,9	0,3762	5,5	0,00026	17,6	0,993
1000	0,6049	53,3	0,4847	7,6	0,00025	18,1	0,993
1200	0,5978	50,9	0,5269	8,0	0,00025	17,0	0,993
1400	0,6108	47,3	0,4537	6,3	0,00026	16,4	0,992
1600	0,6491	71,8	0,2285	4,5	0,00030	26,7	0,992
1700	0,6365	51,7	0,3032	4,4	0,00029	18,9	0,993

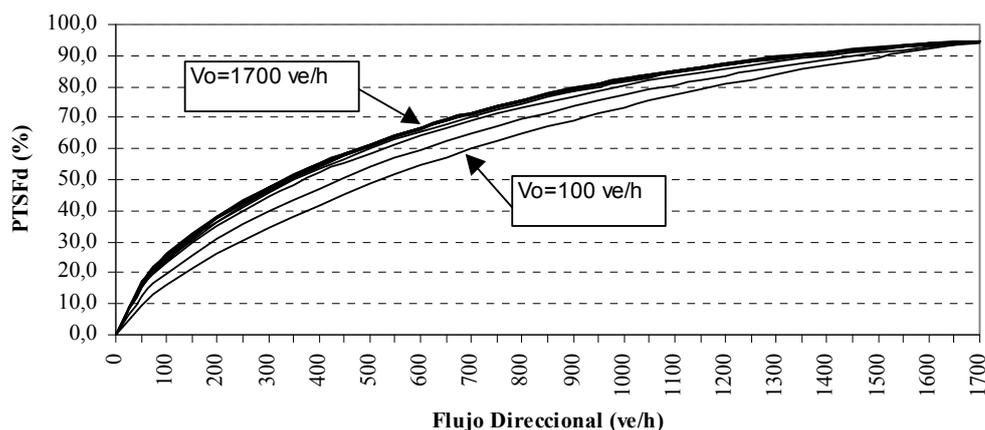


Figura 9. Curvas de relación PTSFd – Flujo direccional obtenida con el modelo propuesto

ajustadas a las condiciones locales, mostradas en la Figura 9, donde se indican las curvas correspondientes a distintos valores de flujo opuesto ( $V_o$ ).

### 3.3. Factores de ajuste para la determinación de tránsito equivalente

Con la aplicación del modelo se obtuvieron nuevos valores de factores de ajuste por pendiente y equivalentes de camiones para la determinación de la tasa de flujo direccional equivalente a partir de corridas con distintos flujos direccionales y con la situación planteada de topografía y/o presencia de vehículos pesados. Los resultados obtenidos para terrenos llanos y ondulados, no muestran diferencias significativas entre los volúmenes equivalentes calculados con los factores locales resultantes y los que se obtendrían con la aplicación de los factores de ajuste del HCM (Maldonado, 2010).

En el caso del factor de ajuste por pendiente Los valores fueron obtenidos a partir de los resultados de realizar corridas del modelo para flujos direccionales de 100 a 1700 v/h en terreno llano y ondulado, velocidad de Flujo libre de 110 km/h y flujos opuestos iguales a los direccionales, es decir que se estarían considerando distribuciones por sentido de 50/50. Para terreno ondulado se consideró un tramo típico con pendientes de hasta un 3% en longitudes menores a 400 m, valor a partir del cual el HCM recomienda analizar pendientes específicas (TRB 2010).

Los valores obtenidos de factores de ajuste por pendiente se muestran en la Tabla 7, en donde en las últimas columnas se han incorporado los valores correspondientes al HCM 2010. Como se puede observar, las principales diferencias con los valores propuestos para este trabajo se presentan para flujos de tránsito menores a 400 v/h, en donde

los valores obtenidos son algo mayores a los propuestos por el HCM.

En el caso del factor de ajuste por presencia de vehículos pesados, los nuevos valores de equivalentes fueron obtenidos a partir de los resultados de realizar corridas del modelo para flujos direccionales de 100 a 1700 v/h con un tránsito compuesto totalmente por vehículos o un tránsito mixto, en terreno llano y ondulado con una velocidad de Flujo libre de 110 km/h y flujos opuestos iguales a los direccionales, es decir que se estarían considerando distribuciones por sentido de 50/50. En cuanto a la composición del tránsito mixto, el HCM plantea un 14% de camiones y 86% de automóviles ya que asumen que ese porcentaje es un valor habitual en las carreteras de EEUU y Argentina, se planteó una composición con una participación de camiones del 25% en base a los datos de tránsito de la Dirección Nacional de Vialidad.

Los valores obtenidos de equivalentes de camiones se muestran en las Tablas 8 y 9, en donde en las últimas columnas se han incorporado los valores correspondientes al HCM 2010.

Para el cálculo de  $ATS_d$  se observó que con tránsitos bajos (menores a 200 ve/h) los valores de equivalentes resultan mayores a los del HCM 2010, siendo mayor la diferencia para el caso de terreno ondulado. En terreno llano, esto se verifica aún para tránsitos mayores a 600 ve/h.

Para el cálculo de  $PTSF_d$  los valores de equivalentes resultan muy similares a los del HCM 2010, levemente mayores en terreno llano para tránsitos bajos y levemente menores en terreno ondulado, hasta 600 ve/h.

Tabla 7. Factores de Ajuste por pendiente propuestos para terrenos ondulados

Flujo de Tránsito direccional (v/h)		Factor de ajuste por pendiente			
		Propuestos		HCM 2010	
		$ATS_d$	$PTSF_d$	$ATS_d$	$PTSF_d$
0	200	0,78	0,85	0,71	0,77
200	400	0,93	0,89	0,71-0,93	0,77-0,94
400	600	0,96	0,93	0,93	0,94
600	800	0,98	0,98	0,99	1,0
800	1000	0,98	1,0	0,99	1,0
1000	1200	0,99	1,0	0,99	1,0
1200	y mayor	1,0	1,0	0,99	1,0

**Tabla 8.** Valores de Equivalentes de camiones para cálculo de  $ATS_d$  en terrenos llanos y ondulados

Flujo (v/h)		Equivalentes de camiones para cálculo de $ATS$			
		Propuestos		HCM	
		Llano	Ondulado	Llano	Ondulado
0	200	1,9	3,2	1,7	2,5
200	400	1,7	1,9	1,7-1,2	1,9-1,5
400	600	1,7	1,8	1,2	1,9
600	800	1,5	1,6	1,2	1,9
800	1000	1,4	1,6	1,1	1,5
1000	1200	1,4	1,6	1,1	1,5
1200	1400	1,4	1,6	1,1	1,5
1400	1600	1,4	1,6	1,1	1,5
1600	y mayor	1,1	1,3	1,1	1,5

**Tabla 9.** Valores de Equivalentes de camiones para cálculo de  $PTSF_d$  en terrenos llanos y ondulados

Flujo de Tránsito (v/h)		Equivalentes de camiones para cálculo de $PTSF$			
		Propuestos		HCM	
		Llano	Ondulado	Llano	Ondulado
0	200	1,2	1,4	1,1	1,8
200	400	1,2	1,3	1,1	1,8-1,5
400	600	1,0	1,1	1,1	1,5
600	y mayor	1,0	1,0	1,0	1,0

## 4. METODOLOGIA DEL HCM AJUSTADA A CONDICIONES LOCALES

### 4.1. Recomendaciones propuestas

A los fines de obtener la metodología del HCM 2010 adaptada a las condiciones locales se ha considerado la misma estructura básica del HCM aplicada al análisis direccional, en donde se incorporan modificaciones en (1) Estimación de la velocidad de flujo libre a partir de mediciones de campo, (2) determinación de factores de ajuste por pendiente y por presencia de vehículos pesados para la determinación de la tasa de flujo direccional equivalente, (3) Relación Básica Flujo – Velocidad utilizada para la determinación de la velocidad media de viaje ( $ATS_d$ ) y (4) Relación Básica Flujo –  $PTSF_d$  utilizada para la determinación del porcentaje de tiempo en seguimiento básico ( $BPTSF_d$ ).

La metodología del HCM 2010 propone que si el estudio de velocidad se realiza en sectores con flujo de tránsito mayor a los 200 v/h, la FFS se determina utilizando una corrección por mayor tránsito, suponiendo que en el mismo período se ha medido el volumen pasante, según la ecuación (6).

$$FFS = S_{FM} + 0,0076 \left\{ \frac{v}{f_{HV,ATS}} \right\} \quad (6)$$

en donde,

$FFS$ : velocidad de flujo libre estimada en la dirección analizada (mi/h);

$S_{FM}$ : velocidad media medida en el campo (mi/h);

$v$ : flujo de tránsito total en ambas direcciones en el período medido (v/h); e

$f_{HV,ATS}$ : ajuste por presencia de vehículos pesados para  $ATS$ .

Para las condiciones locales, para determinar la FFS a partir de mediciones en sectores con flujos mayores a los

200 vehículos por hora (v/h) se propone reemplazar la ecuación del HCM 2010 por la ecuación 7, donde se ha considerado el valor promedio de los coeficientes incluidos en la Tabla 5 para las tres velocidades de flujo libre analizadas:

$$FFS_d = S_{FM} + 0,0131 \frac{V_{fd}}{f_{HV}} + 0,002 \frac{V_{fo}}{f_{HV}} \quad (7)$$

en donde,

$FFS_d$ : velocidad de flujo libre estimada en la dirección analizada (km/h);

$S_{FM}$ : velocidad media medida para la dirección analizada (km/h);

$v_{fd}$ : volumen de tránsito direccional en el período medido en (v/h);

$v_{fo}$ : volumen de tránsito opuesto en el período medido (v/h); e

$f_{hv}$ : ajuste por presencia de vehículos pesados.

En cuanto a la determinación de factores de ajuste por pendiente y por presencia de vehículos pesados para el caso de segmentos direccionales en terrenos llanos y/o ondulados el HCM 2010 presenta tablas con el factor de corrección por pendiente y con valores de equivalentes en función del tránsito y el tipo de terreno. Los valores difieren si se están determinando velocidades de viaje o porcentajes de tiempo en seguimiento. Para la determinación de la tasa de flujo direccional equivalente, se propone reemplazar estas tablas por los nuevos valores obtenidos de acuerdo a lo indicado en el punto 3.3.

La velocidad media de viaje direccional ( $ATS_d$ ) se determina a partir de la FFS calculada, el flujo equivalente en la dirección analizada y en dirección opuesta, y el factor de ajuste por porcentaje de zonas de no sobrepaso en la dirección analizada. La forma de la ecuación deriva del modelo de la relación flujo – velocidad, en donde se plantearon modelos lineales que diferían según la velocidad de flujo libre. Se propone entonces reemplazar la ecuación (1) del

HCM 2010 por las siguientes:

Para FFS mayor o igual a 105 km/h:

$$ATS_d = FFS - 0,016 \cdot v_d - 0,002 \cdot v_o - f_{np} \quad (8)$$

Para FFS entre 95 y 105 km/h:

$$ATS_d = FFS - 0,013 \cdot v_d - 0,002 \cdot v_o - f_{np} \quad (9)$$

Para FFS menor a 95 km/h:

$$ATS_d = FFS - 0,011 \cdot v_d - 0,002 \cdot v_o - f_{np} \quad (10)$$

En donde  $ATS_d$ ,  $FFS$ ,  $v_d$  y  $v_o$  tienen los significados consignados en la antes mencionada ecuación 2 y  $f_{np}$  es el factor de ajuste por porcentaje de zonas de no sobrepaso. Como el modelo de simulación fue empleado para calcular  $ATS_d$  en zonas sin restricción de visibilidad de sobrepaso, para este caso debe adoptarse  $f_{np} = 0$ . Para otras condiciones de visibilidad de sobrepaso se mantienen los valores originales del HCM 2010 hasta tanto se propongan ajustes locales.

El porcentaje de tiempo en seguimiento se determina en función del porcentaje de tiempo en seguimiento base ( $BPTS_d$ ), el flujo de demanda en la dirección analizada y el factor de ajuste por porcentaje de zonas de no sobrepaso en la dirección analizada. Para estimar el  $BPTS_d$  se propone reemplazar la ecuación (4) del HCM 2010 por la función exponencial obtenida en este trabajo (ecuación 5 con los parámetros consignados en la Tabla 6).

De la misma manera que para la determinación de la velocidad media de viaje, como el modelo de simulación fue empleado para calcular  $PTS_d$  en zonas sin restricción de visibilidad de sobrepaso, para este caso debe adoptarse  $f_{np} = 0$ . Para otras condiciones de visibilidad de sobrepaso se mantienen los valores originales del HCM 2010 hasta tanto se propongan ajustes locales.

#### 4.2. Aplicación de la metodología propuesta

A los fines de comparar las diferencias entre los resultados que se obtienen con la aplicación directa de la metodología del HCM 2010 y con la metodología ajustada a condiciones locales que se propone en este trabajo, se ha tomado un tramo de una de las rutas estudiadas en campo que no posee restricciones de sobrepaso. Sobre este tramo se plantearon tres casos con distintos escenarios de demanda cuyos resultados se muestran en la Tabla 10.

- Caso I – Tránsito Medido en Estudio de Campo;

- Caso II – Ruta Comercial 1800 v/h, 25% de pesados y Distribución 55/45; e
- Caso III – Ruta Turística 1500 v/h, 15% de pesados y Distribución 70/30.

Los valores obtenidos con la metodología propuesta tanto de flujo en vehículos livianos equivalentes, de  $ATS_d$  como de  $PTS_d$  resultaron en todos los casos levemente superiores a los obtenidos con la aplicación directa de la metodología del HCM 2010, pero se obtuvieron iguales Niveles de Servicio.

Para la determinación de factores de ajuste por no sobrepaso, el HCM asigna valores, tanto para el cálculo de  $ATS_d$  como de  $PTS_d$ , aún cuando el porcentaje de zonas sin sobrepaso es 0%, e inclusive en la determinación del  $PTS_d$  toma valores negativos para ciertas condiciones de direccionalidad. Si no se consideraran estos factores las diferencias respecto de la metodología propuesta serían mayores.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos muestran que los modelos que mejor representan la predicción de la velocidad media y del porcentaje de tiempo en seguimiento en carreteras argentinas presentan diferencias respecto de los utilizados en la metodología unidireccional del HCM 2010.

Las mediciones de campo y la calibración local de un modelo de simulación microscópico permiten evaluar y establecer recomendaciones para adaptar metodologías generadas en otros ambientes a condiciones locales del tránsito en carreteras. De esta manera, puede aprovecharse una metodología con mucha base mecánica –empírica como la del HCM adaptada para diagnósticos de operación de carreteras en Argentina, como una herramienta más confiable, en una época en que crecientes longitudes de carreteras troncales argentinas están mostrando demandas de carriles de sobrepaso o de ampliación a cuatro carriles.

Considerando los alcances y las limitaciones planteadas en el trabajo, surgen posibles recomendaciones para trabajos futuros en esta línea de investigación:

Ampliar el espectro de datos relevados, procurando realizar mediciones de campo en: a) sitios con velocidades de flujo libre menores, b) pendientes específicas y c) tránsitos direccionales más altos, lo que permitirá la validación del modelo calibrado para diferentes situaciones (incluyendo proporción direccional), o bien ajustar el mismo según los resultados que se obtengan.

Empleando el modelo de simulación adecuadamente ca-

**Tabla 10.** Comparación Metodología HCM 2010 con HCM ajustado localmente

Paso	CASO I		CASO II		CASO III	
	HCM	Propuesta	HCM	Propuesta	HCM	Propuesta
Determinación de Vd para ATSD	310 ve/h	340 ve/h	1128 ve/h	1210 ve/h	1184 ve/h	1237 ve/h
Determinación de Vo para ATSD	262 ve/h	262 ve/h	923 ve/h	990 ve/h	515 ve/h	553 ve/h
Factor de Ajuste fnp para ATSD	3,2	0	0,9	0	2,2	0
ATSD	96,1	100,5	83,5	88,7	83,1	85,6
Determinación de Vd para PTSFd	304 ve/h	310 ve/h	1100 ve/h	1100 ve/h	1167 ve/h	1167 ve/h
Determinación de Vo para PTSFd	235 ve/h	239 ve/h	900 ve/h	900 ve/h	508 ve/h	500 ve/h
BPTSFd	31,7	41,4	79,5	85,7	78,7	85,6
Factor de Ajuste fadj para PTSFd	15,2	0	8,12	0	7,7	0
PTSFd	40,3	41,4	83,9	85,3	84,1	85,6
NS	B	B	E	E	E	E

librado, incorporar a la metodología adaptada a condiciones locales, recomendaciones respecto a valores de FFS menores a 90 Km/h, factores de equivalencia para tramos de pendientes específicas y factores de ajuste por zonas de no sobrepaso.

Los valores de factores de ajuste por zonas de no sobrepaso podrían obtenerse con la aplicación del modelo de simulación ya calibrado estableciendo, para distintas condiciones de tránsito y porcentaje de no sobrepaso, la diferencia entre valores medios obtenidos con un porcentaje específico de no sobrepaso y el mismo tránsito considerando un 0% de zonas de no sobrepaso.

Con base en las posibilidades que brinda el modelo de micro simulación planteado, se podrían ampliar los estudios para el caso de carriles de sobrepaso, lo cual adquiere mayor relevancia si se consideran las importantes inversiones que implican las obras de ampliación de capacidad carreteras.

## REFERENCIAS

- Baruzzi, A.; J. Galarraga e M. Herz (2009) Análisis del Procedimiento para estimar el Nivel de Servicio en Carreteras. In: *XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, T-51, Mar del Plata, Argentina.
- Bessa Júnior, J. E. (2009). *Caracterização do fluxo do tráfego em rodovias de pista simples do Estado de São Paulo*. Disertación (Maestría). Escuela de Ingeniería de San Carlos, San Pablo, Brasil.
- Caimi, M. (2007) *Rotondas: Estimación del Interalo Crítico y del Tiempo en seguimiento y su Aplicación en las Medias de Eficiencia*. Disertación (Maestría). Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- DNV (1967) *Normas de diseño geométrico de caminos rurales*. Dirección Nacional de Vialidad, Ing F. Rühle.
- FHWA (2006) *Annual Vehicle Distance Traveled in Miles and Related Data*. Federal Highway Administration.
- Galarraga J.; M. Herz; L. Albrieu e V. Depiante (2001) El Manual de Capacidad 2000 y la estimación de capacidad y nivel de servicio en intersecciones semaforizadas para condiciones argentinas. In: *XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, C1-180, Buenos Aires, Argentina.
- Galarraga, J. e F. Barsky (1991) *Cálculo de Automóviles Equivalentes para Camiones en Pendientes Específicas*. Instituto Superior de Ingeniería de Transporte (ISIT), Universidad Nacional de Córdoba.
- Galarraga, J., S. Algorry e A. Algorry (1990) *Modelación de Performance de Camiones en Pendientes*. Instituto Superior de Ingeniería de Transporte (ISIT), Universidad Nacional de Córdoba.
- Harwood, D., A. D. May; I. B. Anderson; L. Leiman L. e R. Archilla (1999) *Capacity And Quality Of Service of Two-Lane Highways*. National Cooperative Highway Research Program Report 3-55(3). Transportation Research Board National Research Council Midwest Research Institute University of California-Berkeley EEUU. November 1999.
- Luttinen, T. (2001) Percent Time-Spent-Following as Performance Measure for Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, n. 1776, p. 52–59. DOI: [10.3141/1776-07](https://doi.org/10.3141/1776-07).
- Maldonado, M. (2010) *Validación de la Metodología del Manual de Capacidad HCM a las condiciones locales para el Análisis de Operación en Carreteras*. Disertación (Maestría). Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- McTRANS Center (2010) *TSIS-CORSIM Release 6.2*. University of Florida.
- Romana, M. G. e I. Perez (2007) *La Definición de un umbral de velocidad para medir el nivel de servicio en carreteras de dos carriles*. Revista Rutas España, Agosto 2007. ISSN 1130-7102, N°. 118, p. 25-33
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual 2000*. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, DC.
- TRB (2003) *Two lane road analysis methodology in the Highway Capacity Manual - Final Report*. NCHRP Project 20-7 (160). National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. Midwest Research Institute, Kansas, EEUU.
- TRB (2007) *Approved Corrections and Changes for the HCM 2000. Update 2007*. Committee AHB40, Highway Capacity and Quality of Service.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual 2010*. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, DC.
- Van As, C. (2007) *South African Highway Technology and Practice*. TRB Workshop Presentation. South African National Roads Agency, Limited, 2007.
- Van As S. e C. Van Nierek (2004) The operational analysis of two-lane rural highways. *Proceedings of the 23rd Southern African Transport Conference - SACT 2004*.