

## UNA OPTIMIZACIÓN SIMPLE EN LA GESTIÓN DE CARRETERAS CON PEAJE EN LA SOMBRA

### **Francesc Robusté**

Profesor Titular de Transporte  
ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPC  
Jordi Girona 1-3, Módulo B1 – 08034 Barcelona (España)  
Fax: 93 401 7264, <robuste@etseccpb.upc.es>

### **Carlos Daganzo**

Professor, University of California at Berkeley  
416A McLaughlin Hall – Berkeley CA 94720 (USA)  
<daganzo@ce.berkeley.edu>

### **Mario Aymerich**

Director de Proyectos, Banco Europeo de Inversiones  
100 Boulevard Konrad Adenauer - L2950 Luxemburgo  
<aymerich@eib.org>

## RESUMEN

El modelo de financiación de carreteras con peaje en la sombra consiste en el pago diferido del proyecto, construcción, financiación, operación y mantenimiento de la carretera por parte de la administración competente mediante un canon que es proporcional al tráfico en vehículos-km. El tráfico se cuenta de forma automática y así se evitan los problemas de funcionalidad de los peajes directos por cobro de los mismos. El artículo describe algunas características de este modelo de financiación desde el punto de vista del tráfico y presenta un modelo simple de optimización.

El modelo incide en el corazón del concepto: puesto que el tráfico es contado de forma automática (es decir, con errores de medición) se propone trabajar con el valor del conteo más provechoso para la concesionaria mientras se mantengan los errores de medición dentro de las especificaciones del contrato; los incrementos de ingresos producidos usando un conteo modificado pueden oscilar entre el 2-4% en función del contrato y de la situación de la carretera. La conclusión es que este modelo de financiación, basado culturalmente en el peaje directo en cuanto a la relación entre la administración concedente y la empresa concesionaria, debería evolucionar de forma natural hacia el concepto de *partnership* o asociación público-privada.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE FINANCIACIÓN

El Gobierno del Reino Unido lanzó en otoño de 1992 un programa (*Private Finance Initiative*) para facilitar la colaboración entre el sector público y privado en la construcción de infraestructuras de transporte. En el caso de las carreteras, la iniciativa se plasmó en concesiones con “peaje en la sombra” (pago diferido por parte de la administración del proyecto, construcción, financiación, explotación y mantenimiento de la carretera mediante un canon que es proporcional al tráfico en vehículos-km; la denominación pretende hacer referencia a la posibilidad de, en un futuro, implantar peajes directos en cuanto las tecnologías para el cobro de peaje a distancia y sin parada estén suficientemente extendidas). El peaje no lo pagan, pues, los usuarios de la carretera como ocurre con el peaje directo, sino la administración con cargo a las asignaciones presupuestarias.

El marco contractual se denomina contrato de DBFO (*“Design, Build, Finance and Operate”*) y mediante el mismo, diversos consorcios de empresas privadas han tomado los derechos y obligaciones de diversos proyectos DBFO en carreteras inglesas, por un periodo de concesión de 30 años. Por discreción la carretera objeto de análisis se denominará carretera  $\mathfrak{R}$ .

Los pagos se inician a la firma del contrato (antes de la construcción) y se estructuran de manera que exista un incentivo alto para que el concesionario termine la ejecución de la obra en plazo. Durante el periodo de construcción los pagos oscilan entre una cantidad fija mensual baja o un canon sobre un porcentaje bajo (10-15%) del tráfico previsto, usualmente distinguiendo entre vehículos ligeros y pesados. La distinción entre ligeros y pesados se hace de forma expeditiva en función de la longitud de los vehículos (5,2 m en el ejemplo de análisis) por facilidad de clasificación automática. Los detalles de ingeniería financiera del concepto DBFO no son objeto de este artículo y al respecto puede verse Oleaga y Sánchez (1998).

Esta modalidad de financiación traslada a futuras generaciones de contribuyentes el pago de los compromisos contraídos por la administración actual, tratándose de un pago fraccionado y aplazado de la inversión, y se ha podido constatar que este sistema no es precisamente con el que la administración gasta menos recursos en total (Izquierdo, 1998).

De hecho, se intuye que las concesionarias intentarán cubrir el riesgo de tráficos pequeños, mientras que si el tráfico supera las previsiones o, simplemente, si la composición del tráfico no se ajusta a las mismas, la administración puede acabar gastando más dinero que el necesario. En el caso de la carretera  $\mathfrak{R}$ , la administración infravaloró el porcentaje de pesados resultando que, ya desde los primeros años, se ha superado la banda de máxima cantidad de cobro en vehículos-km de pesados. En la carretera  $\mathfrak{R}$ , por tanto, los vehículos pesados no afectan a los ingresos (cantidad fija mensual en este aspecto) excepto por sus errores en la clasificación y conteo.

La literatura técnica respecto al tratamiento de contajes automáticos y sus implicaciones en el modelo de financiación de peajes en la sombra no es muy extensa: Ramsey y Hayden (1994) desarrolla un método de validación (filtro de datos poco fiables) y tratamiento de datos de tráfico obtenidos mediante contadores automáticos. Phillips (1986) desarrolla un software para estimar flujos de tráfico a partir de muestreos y factores de expansión; Aldrin (1995) presenta un modelo estadístico para describir el tráfico diario en una ciudad suponiendo efectos multiplicativos.

El artículo se estructura en dos secciones principales. La sección 2 describe de forma sucinta varios aspectos interesantes de estas concesiones cuyas decisiones en un sentido u otro pueden significar variaciones de los ingresos de la concesionaria; ninguno de los aspectos descritos en la sección 2 son el objeto principal de este artículo, pero se incluyen para facilitar la comprensión del modelo planteado. La sección 3 plantea un modelo de optimización de los ingresos de la concesionaria habida cuenta que toda medición automática de tráfico lleva asociada un error de medición. Finalmente, se extraen algunas conclusiones.

## **2. LA CONCESIÓN DE LA CARRETERA $\Re$**

Para la concesionaria, una carretera con peaje en la sombra es un negocio con un riesgo acotado (al fin y al cabo, en todo país moderno y medianamente próspero la tendencia del tráfico es al crecimiento), pero contrariamente a lo que ocurre con concesiones de peaje directo, los ingresos máximos están limitados por un techo fijado por la administración concedente. Alcanzando cuanto antes ese techo se maximizan los ingresos posibles y se elimina el riesgo empresarial de la inversión (dejando a los costes como única palanca de actuación para mejorar márgenes).

Esta sección describe diversos aspectos técnicos de los contratos DBFO donde se vislumbra que distintas metodologías pueden dar respuestas “válidas” al mismo problema teniendo distinta incidencia en los ingresos de la concesionaria.

### **2.1. Verificación de los instrumentos de medida**

Los contadores (lazos de inducción magnética) no pueden contar vehículos que no pasan por ellos y, en cambio, no es inusual que hayan dejado de contar algunos vehículos. El estimador del conteo de vehículos debe corregir el conteo del detector con un factor no negativo.

Los factores de corrección se determinan en el proceso de verificación de los instrumentos de medida de cada estación, que se realizan en el caso de la carretera de análisis  $\Re$  una vez cada 90 días. Aplicando técnicas de muestreo se determina el periodo de tiempo necesario de contaje manual.

En efecto, el tamaño de muestra necesaria para garantizar un error del orden del 3% con un intervalo de confianza del 95% se estabiliza para poblaciones grandes (>500.000 vehículos) y crece en cuanto crece el porcentaje de pesados. Debido a que en un periodo de 90 días por la carretera de análisis  $\Re$  han pasado más de dos millones de vehículos, basta contar alrededor de 800 vehículos en la muestra manual para garantizar los errores citados; esto se consigue en unas 2 horas de filmación en vídeo.

## 2.2. Discriminación de vehículos

Los vehículos se discriminan por tamaño del vehículo y por velocidad. Se consideran vehículos pesados los de longitud superior a 5,2 metros; el resto son ligeros. En función de la velocidad se distinguen 4 categorías:

- 5-40 km/h
- 41-70 km/h
- 71-100 km/h
- >100 km/h

## 2.3. Precisión del equipo de medida

La precisión exigida a estas medidas según el contrato a partir del 1 de abril de 1999 (hasta entonces los niveles de precisión eran menores) es la expresada en la Tabla 1 para un intervalo de confianza del 95% (nivel de precisión alcanzable para periodos de 12 horas):

Número de vehículos por categoría y sentido	3%
Número de vehículos por sentido	1%
Número de vehículos por sentido y banda de velocidades	5%

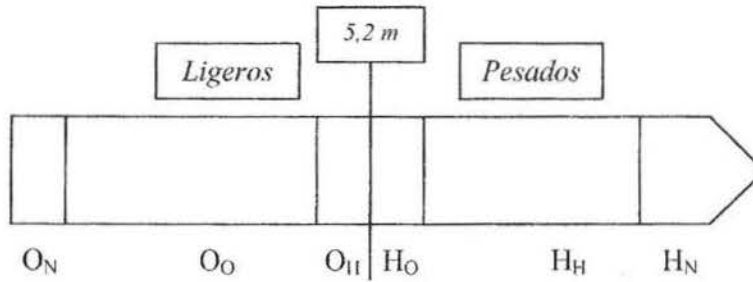
**Tabla 1.** *Precisión estipulada en contrato para el equipo de medida de la carretera R*

## 2.4. El papel de los errores de clasificación

Existen indicios para pensar que el umbral fijado de 5,2 m para discriminar los vehículos según ligeros o pesados es algo corto. Esto hace que parte de los vehículos ligeros se cuenten como pesados y, más raramente, algún pesado se cuenta como ligero. El análisis detallado de los tráficos horarios que se recogen actualmente muestran una cierta correlación de los comportamientos en hora punta entre vehículos ligeros y pesados, lo que no siempre tiene justificación particularmente en el periodo punta de la tarde.

El esquema de la Fig. 1 clarifica los errores de clasificación. Cada tipo de vehículo puede ser no detectado, clasificado correctamente o clasificado erróneamente. Así,  $O_N$  y  $H_N$  hacen referencia a los vehículos ligeros ("other vehicles" en los términos del contrato) y pesados (*heavy*) no detectados respectivamente,  $O_O$  y  $H_H$  son los ligeros y pesados que han sido clasificados correctamente como ligeros y pesados respectivamente. Los problemas surgen debido a  $O_H$ , los vehículos que siendo ligeros se han clasificado como pesados y (menos frecuentemente)  $H_O$ , los vehículos pesados que han sido clasificados como ligeros.

Los errores relativos (sensibilidad de los contadores) de ligeros y pesados dependen del valor absoluto de la diferencia  $|O_H - H_O|$  y dado que el porcentaje de pesados es muy inferior al de ligeros, la categoría  $O_H$  (grandes berlinas que son clasificadas como pesados) es la que determina la sensibilidad crítica del aparato de medida.



**Fig. 1.** Posibilidades de clasificación de los vehículos según su longitud

El error en el conteo total viene determinado por los vehículos no contados ( $O_H$  y  $H_O$ ) respecto al total de los vehículos que han circulado por la carretera (supuestamente contados de forma manual). Los errores relativos de clasificación son:

$$\varepsilon_O = \frac{O_N + O_H - H_O}{O_N + O_O + O_H} \quad \varepsilon_H = \frac{H_N + H_O - O_H}{H_N + H_H + H_O} \quad (1)$$

Debido a la correlación de los errores y a que los vehículos no detectados no deberían influir en el error de clasificación, se proponen varias fórmulas alternativas para la sensibilidad del contador:

$$\frac{O_N + 2(H_O - O_H) + H_N}{O_N + O_O + O_H + H_N + H_H + H_O} \quad (\text{Atkins}) \quad (2a)$$

$$\frac{H_O - O_H}{O_N + O_O + O_H + H_N + H_H + H_O} \quad (\text{Daganzo}) \quad (2b)$$

$$\frac{(O_N + H_O - O_H)\%O + (H_N + H_O - O_H)\%H}{O_N + O_O + O_H + H_N + H_H + H_O} \quad (\text{Aymerich}) \quad (2c)$$

De las tres fórmulas propuestas, la más favorable de cara a una mayor sensibilidad del contador es la (2b), a continuación la (2c), resultando la (2a) la más desfavorable.

## 2.5. Validación de datos

Como los datos sobre tráfico son recogidos de forma automática y luego se traducen a ingresos, y dado que es más probable que un contador “pierda” tráfico (no lo cuente) que no lo contrario, es importante validar los datos que se van midiendo a medida que se va creando el fichero principal.

Para verificar que los datos almacenados por el contador corresponden a situaciones de tráfico coherentes, se han identificado unos patrones de tráfico (*templates*) mediante análisis cluster, una técnica de análisis multivariante que clasifica datos en grupos internamente cohesivos y externamente aislados. Cada patrón define estadísticamente un intervalo de validez razonable de los datos de tráfico horario para cada sentido, tipo de tráfico y día. El intervalo de validez se ha tomado holgado, en función de un percentil inferior y uno superior.

Además de los métodos estadísticos, conviene hacer una identificación empírica de los patrones de tráfico, que permite a menudo conseguir una curva media de distribución de probabilidad acumulada para ciertos tipos de día de un mismo mes y punto de medición (ejemplo: martes, miércoles y viernes laborables del mes de junio), que se ajusta con el test de Kolmogorov-Smirnov.

## 2.6. Reconstrucción de datos

Cuando los datos almacenados sobre el tráfico medido automáticamente son incorrectos y dado su directo significado económico, conviene reconstruirlos basados en información previa o colateral. Aunque el contrato de concesión incluye una manera de reconstruir los datos muy sencilla y directa (tráfico durante el periodo a reconstruir de un día de la semana similar en el último mes), los resultados no tienen por qué ser los más favorables para la concesionaria.

Por este motivo se han derivado tres métodos para la reconstrucción de datos, que no se describen en profundidad al no ser objeto principal de este artículo:

- (i) Correlación. Se usa información correspondiente a otros puntos de medida que en el periodo de tiempo a reconstruir median “correctamente” (espacio).
- (ii) Patrón de tráfico. Se utiliza los patrones de tráfico definidos para el punto de medida en cuestión pero en diferentes periodos de tiempo (tiempo).
- (iii) Daganzo ha desarrollado un estimador estadístico insesgado por máxima verosimilitud que incluye toda la información posible y útil en espacio y en tiempo.

## 2.7. Optimización de las actuaciones que impliquen un menor nivel de servicio

Los contratos acostumbran a incluir también penalizaciones proporcionales al tráfico afectado en el caso de una disminución de la capacidad de la carretera debido a trabajos de construcción, mantenimiento, etc. En función del valor de las penalizaciones y los costes horarios de la maquinaria y mano de obra (seguramente variables en función de la hora del día y del periodo total de trabajo) es posible determinar el momento de menor coste total para la concesionaria (penalización + producción) para llevar a cabo la restricción en la capacidad de la carretera.



### 3. "OPTIMIZACIÓN" DE LOS INGRESOS

El objeto principal del artículo consiste en determinar los valores "oficiales" de los conteos de tráfico ligero y pesado de forma que se maximicen los ingresos sin que las variaciones respecto a los conteos medidos de forma automática puedan detectarse debido al error asociado al conteo. Por facilidad de exposición y formulación, se incide en el caso particular de la carretera de análisis  $\mathfrak{R}$ , que ya se ha avanzado que incluye un porcentaje elevado de vehículos pesados, de forma que se ha alcanzado el umbral máximo de vehículos-km abonables por contrato para este tipo de vehículos. La metodología puede plantearse de forma genérica para cualquier otra situación.

#### 3.1. Formulación

El objetivo de la concesionaria es maximizar los ingresos aportados por el tráfico de vehículos. En el caso de la carretera de análisis  $\mathfrak{R}$  en cuestión, la estructura de pagos de cánones es independiente del tráfico de pesados al haberse superado el umbral máximo de veh-km abonables por contrato. La formulación a partir de ahora sólo tiene en cuenta el tráfico de ligeros en la función objetivo (aunque el tráfico de pesados incide en las restricciones de acotación de los errores, como se ha visto en la sección anterior); los autores han desarrollado también una metodología general de la que la carretera de análisis  $\mathfrak{R}$  constituye un caso particular (Robusté, Daganzo y Aymerich, 1998).

Los ingresos debidos al tráfico de ligeros son proporcionales al número de veh-km medido en toda la carretera, con lo cual maximizar los ingresos es equivalente a maximizar el número de veh-km medido. Para un mes dado, en una carretera dividida en  $T$  tramos básicos con una estación de aforo en cada uno, la función a maximizar es la siguiente:

$$Z_1 = \sum_{k=1}^T f_{a_k} \cdot a_k^{mes} \cdot l_k \quad (3)$$

donde  $f_{a_k} a_k^{mes}$  representa el conteo de vehículos realizado por la estación  $k$  después de ser corregido con un factor de expansión para ligeros,  $l_k$  es la longitud del tramo  $k$  y  $f_{a_k}$  es el factor de expansión del número de vehículos ligeros contados (a determinar).

Maximizar la función  $Z_1$  es equivalente a maximizar el contaje en cada tramo de carretera, y dado que  $a_k$  y  $l_k$  son constantes se puede reformular el problema de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } \{ f_{a_k} \}, \quad \forall k = 1 \div T \quad (4)$$

Las restricciones se aplican a la verificación más reciente de cada estación (siempre que cumpla las especificaciones del contrato) y provienen de imponer que los errores en el aforo corregido no excedan los límites prefijados; para cada tramo se tiene:

$$(i) \quad A \cdot (1 - \varepsilon_a) \leq f_a \cdot a \leq A \cdot (1 + \varepsilon_a) \quad (\text{ligeros}) \quad (5a)$$

$$(ii) \quad B \cdot (1 - \varepsilon_b) \leq f_b \cdot b \leq B \cdot (1 + \varepsilon_b) \quad (\text{pesados}) \quad (5b)$$

$$(iii) \quad (A + B) \cdot (1 - \varepsilon_t) \leq f_a \cdot a + f_b \cdot b \leq (A + B) \cdot (1 + \varepsilon_t) \quad (\text{ligeros} + \text{pesados}) \quad (5c)$$

donde  $A$  y  $B$  denotan el conteo manual (exacto) de vehículos ligeros y pesados respectivamente y  $a$  y  $b$  sus homólogos pero con conteo automático. Los términos  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  y  $\varepsilon_t$  se refieren al error máximo

permitido entre el conteo automático corregido y el conteo manual de ligeros, pesados y de vehículos totales. Están compuestos por dos términos: el error debido a la estación de medida (desconocido) y el error introducido al corregir la medida con los factores de expansión.

Los errores máximos se escogen en función del nivel de riesgo admitido y del incremento de ingresos perseguido:  $\varepsilon_i = \theta \cdot \varepsilon_i^{\text{contrato}}$ , con  $\theta \in [0,25, 1]$ , donde  $\theta$  tenderá a 1 a medida que se tenga más confianza en las estaciones de medida, puesto que  $(1 - \theta)$  representa una cota superior del error del aparato de medida.

La formulación del problema como programa matemático lineal es la siguiente ( $\forall k = 1 \div T$ ):

$$\text{Maximizar } f_{a_k} \text{ sujeto a:} \quad (6a)$$

$$[1] \quad A_k \cdot (1 - \varepsilon_{a_k}) \leq f_{a_k} \cdot a_k \leq A_k \cdot (1 + \varepsilon_{a_k}) \quad (6b)$$

$$[2] \quad B_k \cdot (1 - \varepsilon_{b_k}) \leq f_{b_k} \cdot b_k \leq B_k \cdot (1 + \varepsilon_{b_k}) \quad (6c)$$

$$[3] \quad (A_k + B_k) \cdot (1 - \varepsilon_{t_k}) \leq f_{a_k} \cdot a_k + f_{b_k} \cdot b_k \leq (A_k + B_k) \cdot (1 + \varepsilon_{t_k}) \quad (6d)$$

### 3.2. Algoritmo

Para una estación concreta, el enunciado del problema es equivalente a maximizar  $x = f_a \cdot a$  sujeto a:

$$A \cdot (1 - \varepsilon_a) \leq x \leq A \cdot (1 + \varepsilon_a) \quad (7a)$$

$$B \cdot (1 - \varepsilon_b) \leq y \leq B \cdot (1 + \varepsilon_b) \quad (7b)$$

$$(A + B) \cdot (1 - \varepsilon_t) \leq x + y \leq (A + B) \cdot (1 + \varepsilon_t) \quad (7c)$$

donde se ha llamado  $y = f_b \cdot b$ . Los extremos de los intervalos son valores conocidos y para simplificar la notación se puede representar el problema como:

$$\text{Max } \{x\} \text{ sujeto a:} \quad (8a)$$

$$l_x \leq x \leq L_x \quad (8b)$$

$$l_y \leq y \leq L_y \quad (8c)$$

$$l_t \leq x + y \leq L_t \quad (8d)$$

Por la estructura especial del problema (maximización de una variable de decisión sujeta a varios intervalos de validez), es posible encontrar una solución analítica al programa matemático formulado, cuya aplicación será más eficiente desde el punto de vista numérico. Las anteriores restricciones (8b-d) delimitan una región factible en el espacio  $\{x-y\}$  donde se pueden hallar todas las posibles soluciones.



**Caso A:**  $L_x + l_y > l_x + L_y$ 

La Tabla 2a muestra el valor  $x^*$  en cada celda.

$l_t \setminus L_t$	$l_x + l_y < L_t \leq l_x + L_y$	$l_x + L_y < L_t \leq L_x + l_y$	$L_x + l_y < L_t \leq L_x + L_y$	$L_t > L_x + L_y$
$l_t \leq l_x + l_y$	$L_t - l_y$	$L_t - l_y$	$L_x$	$L_x$
$l_x + l_y < l_t \leq l_x + L_y$	$L_t - l_y$	$L_t - l_y$	$L_x$	$L_x$
$l_x + L_y < l_t \leq L_x + l_y$	N/A	$L_t - l_y$	$L_x$	$L_x$
$L_x + l_y < l_t \leq L_x + L_y$	N/A	N/A	$L_x$	$L_x$

**Tabla 2a.** Valor óptimo de la variable  $x$  en función de cada caso

**Caso B:**  $L_x + l_y < l_x + L_y$ 

La Tabla 2b siguiente muestra el valor  $x^*$  en cada celda.

$l_t \setminus L_t$	$l_x + l_y < L_t \leq L_x + l_y$	$L_x + l_y < L_t \leq l_x + L_y$	$l_x + L_y < L_t \leq L_x + L_y$	$L_t > L_x + L_y$
$l_t \leq l_x + l_y$	$L_t - l_y$	$L_x$	$L_x$	$L_x$
$l_x + l_y < l_t \leq L_x + l_y$	$L_t - l_y$	$L_x$	$L_x$	$L_x$
$L_x + l_y < l_t \leq l_x + L_y$	N/A	$L_x$	$L_x$	$L_x$
$l_x + L_y < l_t \leq L_x + L_y$	N/A	N/A	$L_x$	$L_x$

**Tabla 2b.** Valor óptimo de la variable  $x$  en función de cada caso

**Caso C:**  $L_x + l_y = l_x + L_y$ 

Idéntico al caso B, pero eliminando la tercera fila y la segunda columna.

**Casos extremos:**

Para  $l_t > L_x + L_y$  no existe solución. Cuando  $l_t = L_t$  puede pasar:

- (i)  $l_x \leq l_t \leq L_x$ . Entonces  $x^* = l_t - l_y$  e  $y^* = l_y$  si  $l_x \leq l_t - l_y$ . En caso contrario no existe solución.
- (ii) Si  $l_t < l_x$  o  $l_t > L_x$ , no existe solución.

La solución óptima de las variables de decisión, por tanto, es la siguiente:

$$x^* = \min \{ L_x, L_t - l_y \} \quad (9a)$$

$$\max \{ l_t - x^*, l_y \} \leq y^* \leq \min \{ L_t - x^*, L_y \} \quad (9b)$$

Los factores de expansión se obtienen entonces como:  $f_{a_k} = \frac{x^*}{a_k}$  y  $f_{b_k} = \frac{y^*}{b_k}$ . (10)

Con la notación de errores y contajes inicial, se puede expresar directamente la solución óptima:

$$f_{a_k}^* = \frac{A_k}{a_k} \left[ 1 + \min \{ \varepsilon_a, \varepsilon_l + \frac{B_k}{A_k} (\varepsilon_b + \varepsilon_l) \} \right], \quad (11)$$

### 3.3 Aplicación

Se ha aplicado la metodología anterior a la carretera de análisis  $\mathcal{R}$  durante un año. La Tabla 3 muestra los resultados de la simulación (valores de vehículos-km expresados de forma relativa respecto al total), donde se recuerda que  $\theta = \varepsilon_i^{\text{contrato}} / \varepsilon_i$  tiene un significado de precisión del equipo de medida.

Carretera $\mathcal{R}$	Veh-km ligeros	Veh-km pesados	Veh-km total	Incremento Ligeros	Incremento Pesados
Contajes reales	84,8%	15,2%	100%	N/A	N/A
Simulados $\theta=0,5$	87,2%	14,8%	102%	2,88%	-2,32%
Simulados $\theta=0,75$	88,3%	14,7%	103%	4,11%	-3,29%
Simulados $\theta=1$	89,4%	14,6%	104%	5,47%	-4,19%

**Tabla 3.** Contajes reales y simulados para optimizar los ingresos

Interesa, por tanto, magnificar el número de ligeros “contados” y disminuir el número “oficial” de pesados con objeto de caer dentro de los límites admisibles del error de conteo conjunto. Con este ajuste, la concesionaria cobra lo mismo por los vehículos pesados (el máximo acordado en el contrato), mientras que puede facturar más por el incremento de ligeros.

## 4. CONCLUSIONES

Aunque las conclusiones del modelo aplicado son obvias en cuanto a utilidad y consistencia (incrementos de ingresos del 2-4% en función del contrato y de la situación de la carretera), conviene incidir que tanto el modelo desarrollado en el artículo como las posibilidades insinuadas en la sección introductoria no son más que un claro reflejo de la inmadurez de este modelo de financiación.

Los defectos detectados en los contratos son de tipo técnico y de tipo estratégico. Mientras que los de tipo técnico son fácilmente solucionables con especialistas competentes, los de tipo estratégico radican en un plagio de la cultura del peaje directo en cuanto a la relación entre la administración concedente y la empresa concesionaria. A nuestro entender este tipo de relaciones debería evolucionar hacia el concepto de *partnership* o asociación público-privada (APP), de manera similar a como han evolucionado las relaciones entre cargadores y operadores logísticos en la pasada década.

## NOTACIÓN

$T$ : Número de tramos en que está dividida la carretera

$a_k$ : Número automático de vehículos ligeros del test de verificación de la estación  $k$

$A_k$ : Número manual de vehículos ligeros del test de verificación de la estación  $k$

$b_k$ : Número automático de vehículos pesados del test de verificación de la estación  $k$

$B_k$ : Número manual de vehículos pesados del test de verificación de la estación  $k$

$a_k^{mes}$ : Número automático de vehículos ligeros medidos en el tramo  $k$ , para un mes dado

$b_k^{mes}$ : Número automático de vehículos pesados medidos en el tramo  $k$ , para un mes dado

$l_k$ : longitud del tramo  $k$

$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_t$ : errores máximos permitidos después de efectuar la corrección (en ligeros, pesados y total respectivamente). Son un porcentaje del error máximo establecido en el contrato, a escoger en función del nivel de seguridad que se desee:  $\varepsilon_i = \theta \cdot \varepsilon_i^{contrato}$ , con  $\theta \in [0,25, 1]$

$\varepsilon_i^{contrato}$ , con  $\theta \in [0,25, 1]$

$f_{ak}, f_{bk}$ : Factores de expansión de los veh-km para el tramo  $k$  (aplicables a vehículos ligeros y pesados respectivamente)

## AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada en la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona (España) para la empresa SICE S.A. bajo convenio C2930. En las aplicaciones numéricas del modelo han intervenido también Eva Solernou (UPC) y Antoni Bassas (SICE S.A.).

## REFERENCIAS

- Aldrin, M. (1995) "A statistical approach to the modelling of daily car traffic", *Traffic Engineering + Control*.
- Izquierdo, R. (1998) "Modos de financiación de infraestructuras con participación de la iniciativa privada" *Carreteras 97*, páginas 6-27, Madrid.
- Oleaga, L. y L. Sánchez (1998) "La financiación de carreteras por el sistema de peajes en la sombra en Gran Bretaña, primeras experiencias" *Carreteras 97*, páginas 113-120, Madrid.
- Phillips, G. (1986) "Making the most of available traffic data", *Traffic Engineering + Control*.
- Ramsey, B. y G. Hayden (1994) "Autocounts: A way to analyse automatic traffic count data" *Traffic Engineering + Control*.
- Robusté, F., C.F. Daganzo y M. Aymerich (1998) "Optimización de la gestión de autopistas con peaje en la sombra" Monografía no publicada elaborada por el Laboratorio de Análisis y Modelización del Transporte (LAMOT) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en Barcelona (España).