

Metodología para estimación del TMDA para cálculos relacionados con aplicaciones asfálticas

Ing. Julián Rivera
Ing. Edgardo Masciarelli
Centro de Investigaciones Viales LEMaC
Argentina

Resumen

En los estudios que involucran las mezclas asfálticas (cálculo de paquete estructural, cálculo de vida útil, posibilidad de empleo, diseño de mezcla, etc.), es requisito básico conocer el tránsito que por ésta circula, expresado por el *TMDA* (volumen promedio diario a lo largo de un año calendario).

Así, se promedian volúmenes generados por actividades no constantes o intermitentes (estudio, trabajo, vacaciones, esparcimiento, etc.). Esta variabilidad requiere realizar conteos continuos para arribar al *TMDA*, lo cual lleva a esfuerzos de envergadura.

En tareas tácticas y operativas (de mediano y corto plazo), en aquellas de soluciones inmediatas o para las cuales no se cuenta con los suficientes recursos o datos esto se hace difícil. Por tal razón, suele recurrirse a conteos esporádicos de tránsito que, ante la carencia de series históricas, son extrapolados de manera subjetiva, por profesionales que a veces no guardan relación directa con la ingeniería de tránsito. La incertidumbre generada así es muy grande, desvirtuándose la aplicación posterior de parámetros que sí están sostenidos en datos certeros y obteniéndose confiabilidades bajísimas.

Por estas razones se ha planteado este trabajo, tesis de maestría, que busca la obtención, divulgación y utilización de una metodología objetiva, para la extrapolación de conteos esporádicos de tránsito al *TMDA*; aplicable en una amplia zona homogénea (Provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos y La Pampa) de la Argentina.

1. El problema a considerar

En la mayoría de los estudios que involucran las mezclas asfálticas, es requisito básico conocer de manera aproximada el volumen de tránsito sobre ésta,

expresado por el *TMDA*, es decir el volumen promedio diario de tránsito registrado a lo largo de un año calendario sobre una sección de un camino o arteria. Pero esta cuestión de medir durante todo un año, para recién allí alcanzar conclusiones muchas veces no es factible, pues se trata de aplicaciones en lo táctico u operativo, es por esto que se recurre a los conteos esporádicos para su posterior extrapolación.

Mediante este trabajo se busca aportar una herramienta simplificada, constituida por una metodología de relevamiento y un algoritmo de aplicación, sostenida en un fuerte análisis estadístico de regresión, que podrá ser utilizada como alternativa o reemplazo de las metodologías clásicas empleadas, sin necesidad de extrapolaciones subjetivas generadas por la falta de datos o el conocimiento acabado del lugar en estudio, y con la suficiente confiabilidad en la aproximación.

2. Antecedentes a nivel mundial

A nivel mundial existen estudios tendientes a establecer los parámetros de comportamiento del tránsito en busca de calcular el *TMDA* mediante la utilización de conteos esporádicos. Como ejemplo se pueden mencionar las curvas de Petroff y Blensly, destacando su particular antigüedad y restricción geográfica.

Es justamente la restricción geográfica lo que hace que no exista una metodología clara para su aplicación generalizada y mucho menos para la región central de la Argentina, lugar propuesto para la realización del estudio.

Por otro lado, del análisis de bibliografía de reconocidos especialistas en la temática, como C. Papacostas, puede observarse que para la obtención de *TMDA* sin conteos continuos, la ingeniería de tránsito ha tendido a la implementación de los denominados “censos de cobertura”. Estos son básicamente la extrapolación de mediciones puntuales realizadas en una sección por

medio de las curvas establecidas por censos continuos en puntos cercanos al lugar en estudio.

Esta técnica sólo puede ser bien utilizada cuando el análisis es dirigido por un especialista de tránsito, que puede interpretar la validez de relacionar un punto con el otro (en función de la similitud en las necesidades cubiertas por el tramo de vía), generalmente no disponible en estudios que requieren la valoración del *TMDA* para implementaciones de mezclas asfálticas en etapas de evaluación de alternativas, anteproyecto o incluso en el propio proyecto. A esta complicación debe sumarse el hecho, no menor, de que en la práctica sólo se cuenta con este tipo de conteos continuos en rutas principales o zonas urbanas muy desarrolladas, quedando sin cobertura la inmensa mayoría del resto de la red.

3. El estudio en cuestión

3.1. Obtención de los datos

3.1.1. Análisis de formas

Habitualmente, tal vez por una cuestión de cálculos, cuando se aplica el concepto de incremento de tránsito se tiende a la simplificación de considerarlo como un hecho escalonado año a año. Es decir que conceptualmente se considera que durante el ciclo no existe un crecimiento propio del tránsito, lo que simplifica el análisis de series por anularse la componente generada por la tendencia. La interpretación gráfica de lo expuesto la podemos ver en la Figura 1. Donde la *TCT* es la tasa de crecimiento del tránsito para los respectivos ciclos.

En cambio, una visión análoga de lo que dicta la teoría de series de tiempos, sería la que se observa en la Figura 2, en donde se da una curva de tendencia (por ejemplo lineal) al largo plazo de la serie, de la cual se desprenden las estacionalidades.

El considerar los incrementos de tránsito en forma anual como valores de referencia, según se hace tradicionalmente, es una técnica por demás empleada y difundida, que tiene una buena adaptación para su empleo y que el profesional relacionado con la temática acepta intuitivamente. Lo que en cambio resulta difícil de aceptar es la idea de llevar al crecimiento del tránsito en un hecho escalonado en el tiempo. Resulta más realista el aceptarlo como algo gradual dentro del propio ciclo anual, en forma proporcional (crecimiento lineal), en donde la pendiente de lo que podríamos

denominar “tendencia anual” lo refleja. Atendiéndose a lo que ilustramos en la Figura 3.

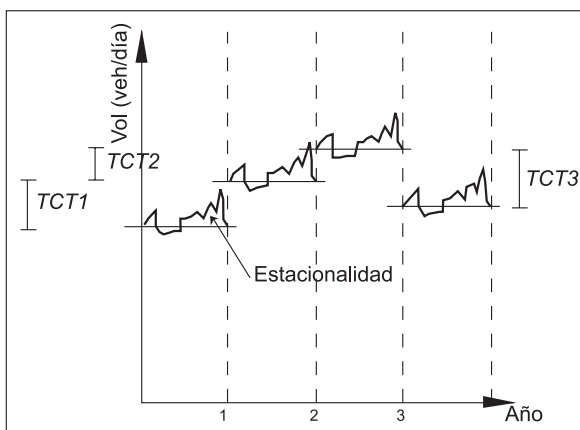
El tomar como base estos conceptos es lo que lleva a la necesidad de retrotraer los datos de tránsito para su comparación al día 1 del año, para que luego de ser realizados los cálculos necesarios puedan ser expandidos en función de la tasa de crecimiento.

Estas consideraciones agregan un término adicional a la forma tradicional de cálculo del *TMDA*, ya que al encontrarse los datos librados de su “tendencia anual” es necesario incluirla al final del cálculo. Por ello, en rasgos generales, el modelo en desarrollo llevará la siguiente forma:

$$TMDA = TD_0 \times ALG_{COEF.D} \times ALG_{COEF.M} \times ALG_{TCT}$$

Análisis tradicional del tránsito

Figura 1



Análisis según la estadística

Figura 2

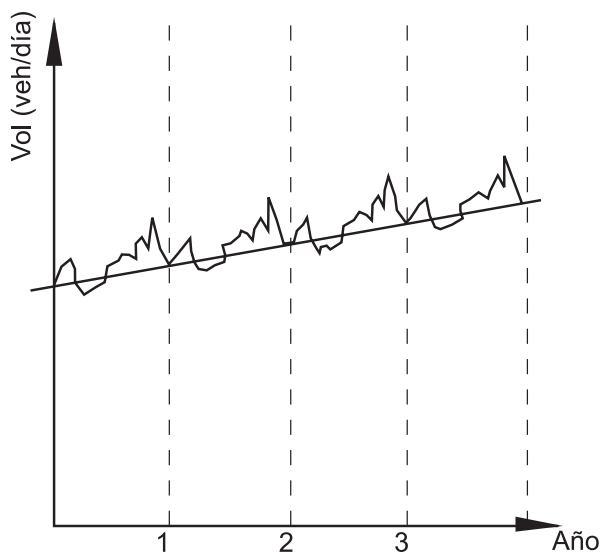
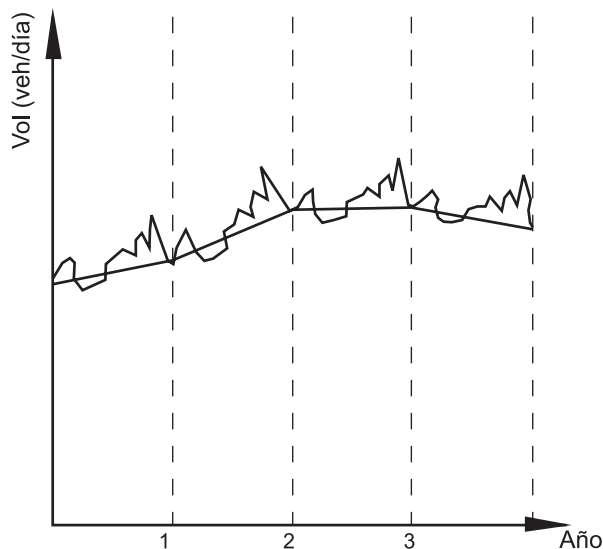


Figura 3 Análisis propuesto



coeficiente de corrección diario que lleva el valor de TD_0 a la media mensual, en donde la variable independiente es aquella que toma valor 1 para el domingo, 2 para el lunes, ..., y 7 para el sábado.

$ALG_{COEF.M}$ = Es el algoritmo que permite obtener el coeficiente de corrección mensual que lleva el valor de la media mensual a la media anual, en donde la variable independiente es aquella que toma valor 1 para enero, 2 para febrero, ..., y 12 para diciembre.

ALG_{TCT} = Es el algoritmo que permite llevar a ese valor medio anual al $TMDA$ al afectarlo por la tasa de crecimiento de tránsito supuesta para ese año en estudio.

3.1.2. Delimitación del área de estudio y antigüedad de los datos

Como ya se mencionó, para el presente trabajo hemos establecido como área en estudio la conformada por las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe, La Pampa y Entre Ríos. Estas provincias de la región central de la Argentina son seleccionadas por conformar una región relativamente homogénea, cuando se la analiza desde el punto de vista socioeconómico.

Como unidad de análisis fijamos al partido (o departamento) en los que se encuentran divididas las provincias, esta decisión surge como un balance entre la precisión deseada en el estudio y la exactitud alcanzable con los datos disponibles.

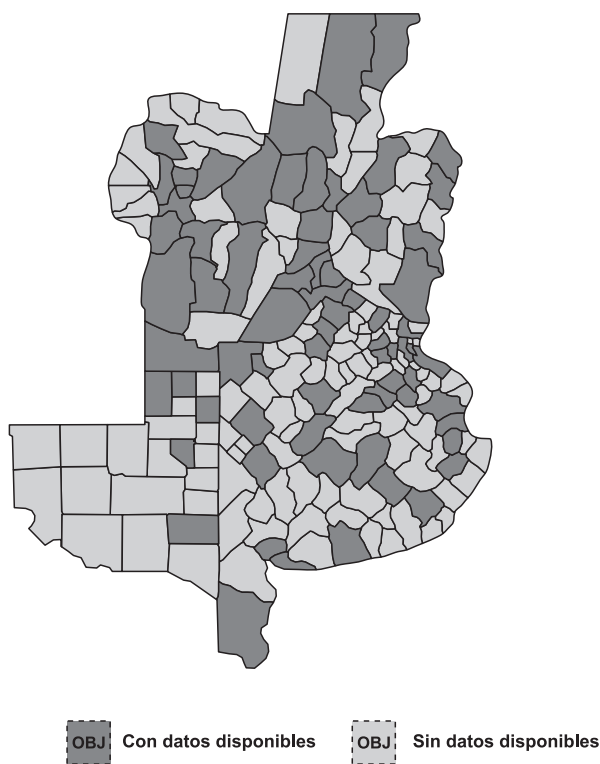
Como comenzamos el análisis de datos a finales del año 2004, y por cuestiones de antigüedad y disponibilidad, decidimos emplear para la obtención del modelo las series comprendidas entre los años 1993 y 2003, destinando los datos correspondientes al año 2004, exclusivamente a la validación de los algoritmos resultantes.

Con estos parámetros fijados, procedemos al relevamiento de datos que permite obtener el mapa de cobertura que se observa en la Figura 4.

3.1.3. Elaboración de la matriz homogénea

Los datos recolectados se encuentran expresados de muy diversas formas, poniendo en evidencia la falta de un procedimiento generalizado de orden nacional al respecto.

Figura 4 Mapa de cobertura de los datos recabados



Donde:

TD_0 = Es el tránsito diario determinado por el censo esporádico descontado el crecimiento hasta esa altura del año.

$ALG_{COEF.D}$ = Es el algoritmo que permite obtener el

Esta heterogeneidad en las características de los datos nos genera la necesidad de una fuerte tarea de reconversión para su inclusión en una matriz general, que por su nueva condición denominamos homogénea.

En realidad esta matriz puede ser también analizada como un grupo de matrices, ya que por la estructura elegida para el trabajo debemos contar como resultado final con matrices que permitan efectuar las regresiones para la obtención de:

- Algoritmos de tasa de incremento de tránsito
- Algoritmos de coeficientes de corrección diaria
- Algoritmos de coeficientes de corrección mensual

Para la conformación de la matrices numéricas sobre las que realizamos las regresiones establecemos para las condiciones de borde de la vía:

-Para la característica de urbanidad (urbano o rural) incluimos una variable binaria que toma valor 1 cuando el entorno es urbano y 0 cuando es rural. Consideramos entorno rural cuando no se genera con densidad la actividad residencial y/o comercial, es decir que la accesibilidad se da desde sectores de actividad rural no cotidiana.

-Para el uso, incluimos una variable binaria que toma valor 1 cuando es comercial y valor 0 cuando es turístico. Consideramos uso turístico cuando éste es el preponderante en época de vacaciones, es decir que la vía sirve evidentemente de vinculación a plazas turísticas.

-Para la existencia de peaje incluimos una variable binaria que toma valor 1 si existe cobro de peaje y 0 si no existe.

-Para la clasificación del tránsito incluimos una variable dada por el porcentaje de vehículos livianos circulantes (automóviles y camionetas).

3.2. Empleo de los datos

3.2.1. Obtención de los algoritmos para el incremento del tránsito

Como hemos dicho, a los datos incluidos en las matrices a ser empleadas en las regresiones se les ha discriminado la tendencia. Esto nos lleva a la necesidad de incorporar posteriormente un término que considere el incremento del tránsito.

Para obtener estimativos confiables de los volúmenes vehiculares que circularán en el futuro se utilizan modelos, los cuales son alimentados utilizando parámetros socioeconómicos (como la población total, la población económicamente activa, la población ocupada y los vehículos registrados, etc.).

Uno de los datos socioeconómicos empleable es el de registro automotor, recabado en la *DNRPA* (Dirección Nacional de Registros de Propiedad Automotor), el cual concuerda en ser entregado por año y por localidad. Establecemos entonces:

$$X = \text{variación de parque automotor (variable independiente)} = (\text{automotores en ciclo en estudio} - \text{automotores ciclo anterior}) \times 100 / (\text{automotores ciclo anterior})$$

$$Y = \text{crecimiento tránsito (variable dependiente)}$$

Previo al análisis de regresión efectuamos el análisis estadístico de la muestra, el cual nos da como resultado:

- Asimetría tipificada = 2,1114
- Curtosis tipificada = 1,46844

Como vemos la asimetría resulta levemente por encima del umbral de 2, lo cual consideramos no llegará a afectar el análisis.

Análogamente efectuamos el análisis estadístico de la variable variación de parque automotor, resultando:

Gráfico de caja y bigotes de la variación del parque automotor

Figura 5

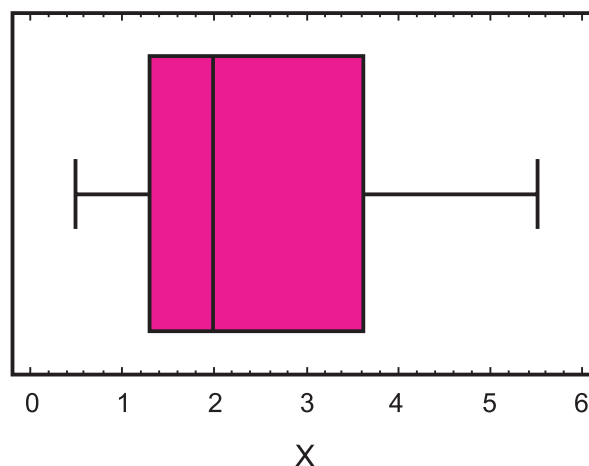
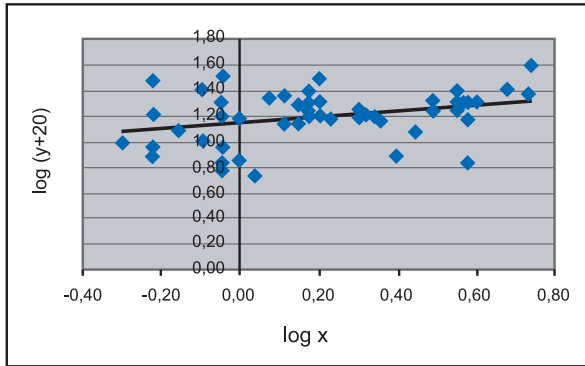


Figura 6

Gráfico variación tránsito vs. variación parque automotor, afectados por log



- Asimetría tipificada = 1,91099
- Curtosis tipificada = -0,8162

Observamos como la asimetría tipificada y la curtosis se ubican dentro de los valores límites, anexándose al análisis la gráfica de cajas y bigotes de la Figura 5.

Podemos considerar entonces que la muestra es sensiblemente normal y pasar al análisis de regresión, con el “módulo de regresión” del programa Microsoft Excel.

Pero al realizar las regresiones y tras descartar algunos datos atípicos, los valores que obtenemos son:

- Función de regresión $\log(Y+20) = 0,19 \log X + 1,18$
- Coeficiente de correlación múltiple 0,62
- Coeficiente R^2 de determinación 0,39
- Coeficiente R^2 ajustado 0,38
- Error típico 0,07

Estos valores no llegan a los umbrales de aceptabilidad que nos hemos fijado.

Pasamos por ello al empleo del programa TCWin, que permite establecer modelos más complejos y ajustados, que al fin y al cabo, podrían ser establecidos por regresión simple mediante las adecuadas linealizaciones. Este programa, al ser cargado con la matriz de datos, nos da como resultado una lista de regresiones en orden decreciente de coeficiente de correlación.

Basados en el “principio de parsimonia”, de la lista obtenida tomamos la ecuación que balancea el ajuste con la simplicidad de expresión, en este caso:

-Función de regresión

$$Y = 35,596896 - 243,628504 / X + 555,412790 / X^2 - 585,523100 / X^3 + 283,681553 / X^4 - 51,088958 / X^5$$

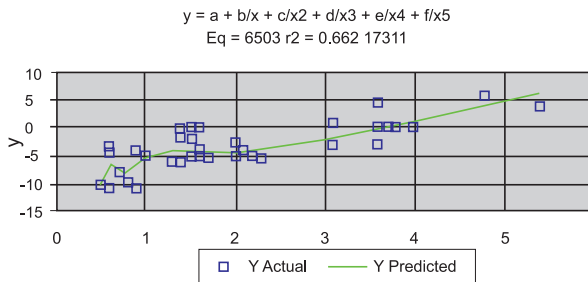
- Coeficiente R^2 de determinación 0,66
- Coeficiente R^2 ajustado 0,59
- Error típico 2,40
- Estadístico F 11,37 (p -valor 0,0000) significativo al 99%

En la Figura 7, podemos observar como la función se ajusta a nuestra nube de puntos.

Llegamos de este modo a una ecuación que nos arroja valores aceptables de ajuste.

Figura 7

Ajuste de la ecuación a la nube de puntos, empleando variación parque automotor



Como la gráfica de tasa de crecimiento de tránsito vs. variación parque automotor, no nos permite establecer a simple vista una relación entre ambas variables, decidimos buscar directamente la linealización de los datos. Tomamos entonces logaritmos de la variable independiente y logaritmos de la variable dependiente (trasladando el origen 20 unidades para evitar valores negativos). Visualmente parece que ahora una regresión lineal puede ser viable, según se observa en la Figura 6.

3.2.2. Obtención de los algoritmos para los coeficientes diarios

Para el análisis en busca del algoritmo que nos permita calcular los coeficientes diarios de corrección, fijamos como punto de partida a las siguientes variables:

$X =$ variable independiente, representa los días de la semana

$Y =$ variable dependiente, es el coeficiente diario

Con estas variables en juego, buscamos ahora establecer la validez de la muestra, efectuamos entonces el análisis estadístico de los coeficientes diarios, dándonos como resultado:

- Asimetría tipificada = 1,88183
- Curtosis tipificada = 2,0702

Podemos ver que la curtosis se ubica levemente por encima de los límites establecidos, por lo cual consideramos que no se desvirtúa el análisis por regresión.

Una vez confirmada la normalidad, analizamos la gráfica de coeficientes diarios vs. días de semana de la Figura 8.

Aquí no podemos observar claramente grupos de nubes de puntos aislados y podríamos pensar en la realización de una regresión única. Pero es de esperarse un comportamiento diferente entre dos grandes grupos de vías, las que sirven eminentemente a fines turísticos y las que lo hacen a fines comerciales.

Decidimos entonces incluir la variable clasificatoria por uso de la vía, previo a los análisis de regresión.

Como ya se había establecido esta variable toma valor 1 cuando es comercial y 0 cuando es turística. La Figura 9 y la Figura 10, reflejan la inclusión de esta clasificación.

Podemos ver como la inclusión de la clase realmente genera dos nubes de puntos diferenciables y como éstas convalidan lo asegurado en la consulta bibliográfica. Así, la primera nube presenta una tendencia hacia una parábola cóncava hacia abajo y la segunda aparenta ser una parábola cóncava hacia arriba. Estamos ahora en condiciones de realizar las regresiones por separado que analizamos a continuación.

3.2.2.1. Análisis para vías de uso turístico

Cuando analizamos la Figura 9 observamos que la nube de puntos se asemeja a una parábola hacia abajo, mostrando una alta concentración en todos los días, salvo el día domingo que presenta una cierta dispersión de valores.

En función de esta evidente forma de parábola, decidimos comenzar el análisis de regresión aplicando directamente una linealización de la variable

independiente que nos permita la obtención de su función. Esto se logra tomando cuadrados de esta y generando la regresión como si fueran dos las variables independientes (los valores de X y los valores de X^2), es decir como una regresión múltiple. Mediante esta técnica obtenemos los siguientes resultados:

Gráfico de coeficientes diarios vs. día de la semana

Figura 8

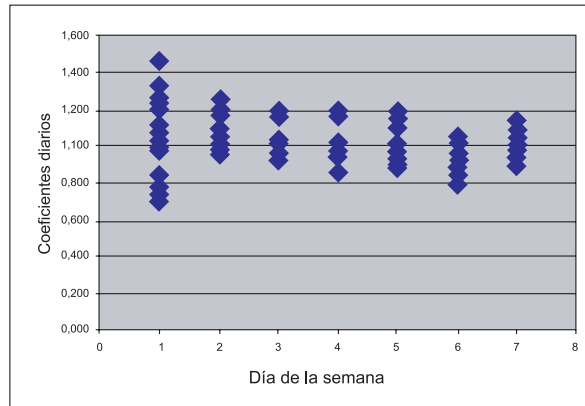


Gráfico de coeficientes diarios para vías turísticas

Figura 9

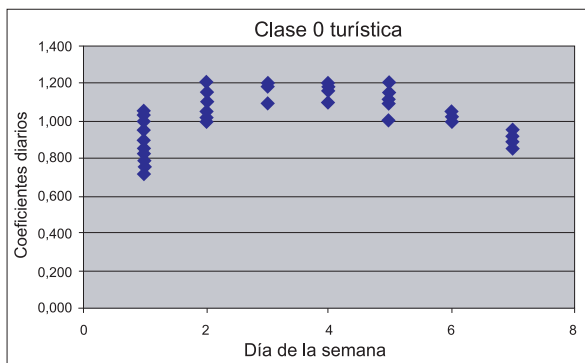


Gráfico de coeficientes diarios para vías comerciales

Figura 10

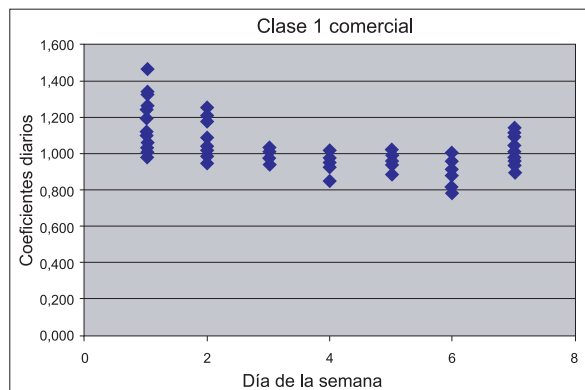


Figura 11 Nube de puntos para los coeficientes diarios en vías comerciales con peaje

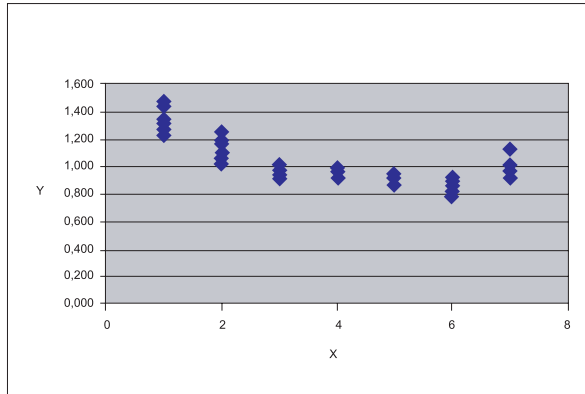
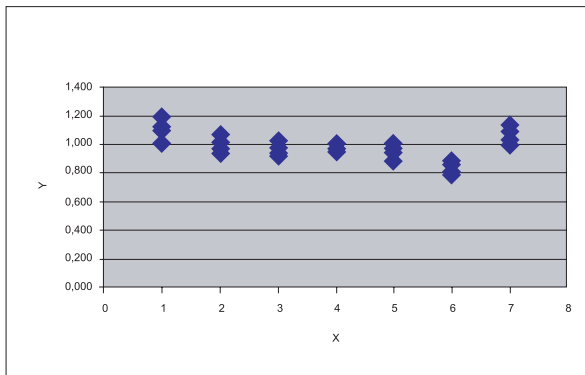


Figura 12 Nube de puntos para los coeficientes diarios en vías comerciales sin peaje



- Función de regresión $Y = -0,043715 X^2 + 0,363511 X + 0,452025$
- Coeficiente de correlación múltiple 0,97
- Coeficiente R^2 de determinación 0,94
- Coeficiente R^2 ajustado 0,94
- Error típico 0,04

La estadística de los residuos resulta:

- Asimetría tipificada = 0,35049
- Curtosis tipificada = -0,553592

En función de estos resultados llegamos a la conclusión de que el algoritmo obtenido para las vías turísticas es válido.

3.2.2.2. Análisis para vías de uso comercial

Cuando analizamos la Figura 10, correspondiente a la gráfica de los coeficientes de corrección diarios vrs. día

de la semana para vías de uso comercial, vimos que se podía intuir una relación asimilable a una parábola cóncava hacia arriba. Por esto, al igual que en el caso de las vías turísticas, comenzamos el análisis de regresión linealizando con la variable independiente para obtener una ecuación cuadrática. Los resultados obtenidos en este experimento no son buenos, posiblemente por falta de inclusión de una nueva variable de clasificación.

Para esto volvemos al análisis de la Figura 10, donde además de la concavidad hacia arriba de la clase para la nube de puntos, observamos cierta dispersión en los valores extremos (es decir 1 y 7).

Tres son las variables clasificatorias que podemos incluir, en función de los datos disponibles. Estas son la urbanidad de la vía, la existencia de peaje o la clasificación del tránsito. El análisis detallado de las series en función de estas tres variables nos lleva a pensar que la variable clasificatoria faltante es la de existencia o no de peaje sobre la vía, con la que se obtienen las nubes de puntos de la Figura 11 y de la Figura 12.

Realicemos el análisis para esta nueva clasificación.

3.2.2.2.1. Análisis en vías comerciales con peaje

La nube de puntos para este caso presenta una clara concavidad hacia arriba, aunque en un sector medio muestra un salto en la función. Esto nos lleva a pensar que un polinomio de grado superior puede ser la mejor forma de regresión.

Volvemos al empleo del programa TCWin. Con los datos ingresados, obtenemos un listado de ecuaciones de regresión ordenadas por su coeficiente de determinación, que para este caso resulta de 0,88 para alrededor de 20 ecuaciones. Guiados nuevamente por el "principio de parsimonia", de entre éstas tomamos la de más sencilla expresión y la analizamos en detalle, obteniendo:

- Función de regresión $Y = 0,002781 X^5 - 0,053475 X^4 + 0,378762 X^3 - 1,184775 X^2 + 1,434157 X + 0,758143$
- Coeficiente R^2 de determinación 0,88
- Coeficiente R^2 ajustado 0,85
- Error típico 0,06

Estos resultados verifican el buen ajuste obtenido con la regresión de segundo grado, ya que con una mayor sencillez de cálculo se obtienen resultados similares.

El análisis gráfico de la curva ajustada de grado 5, (Figura 13) nos permite establecer a ésta como la función de regresión buscada.

3.2.2.2. Análisis en vías comerciales sin peaje

La Figura 12, correspondiente a la nube de puntos para esta clasificación, nos muestra nuevamente a grandes rasgos una parábola con concavidad hacia arriba, pero con ciertas ondulaciones que nos llevan a pensar que un ajuste polinómico de grado superior tendría que ser apropiado. Por tal razón, decidimos hacer correr los datos con el programa TCWin. Así, obtenemos el listado de ecuaciones con sus correspondientes coeficientes de determinación. Guiados nuevamente por el "principio de parsimonia" determinamos la ecuación óptima:

-Función de regresión $Y = 1,299385 - 0,175416 X + 0,110582 X^2 \ln X - 0,033388 X^3 + 0,001731 e^x$

-Coeficiente R^2 de determinación 0,70

-Coeficiente R^2 ajustado 0,67

-Error típico 0,04

La regresión presenta valores admisibles, mostrando su curva de ajuste, como se ve en la Figura 14.

3.2.3. Obtención de los algoritmos para los coeficientes mensuales

El salto conceptual desde el coeficiente diario al mensual podría ser criticado, pero la carencia generalizada de datos hace imposible la obtención de coeficientes más detallados, cuando no lo es incluso la obtención del propio coeficiente mensual.

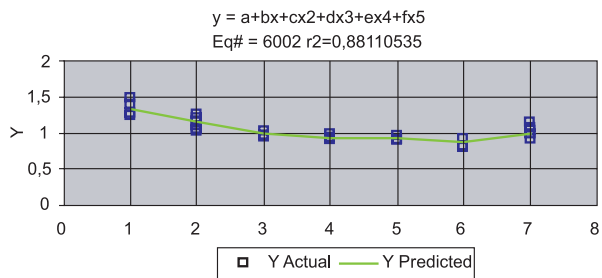
Consideramos que no es necesario contar con un coeficiente intermedio que distinga los volúmenes entre las distintas semanas de un mes. De todos modos sería adecuado que este parámetro, en caso de que las condiciones particulares de un estudio hicieran imperiosa su determinación, tome valor en forma independiente del mes que se trate. Razón por la cual podría incluirse sencillamente como un factor más en la ecuación final para el cálculo del TMDA, mediante un algoritmo que posea como variable independiente la ubicación que la semana en la que se realiza el conteo posee dentro del mes.

Ratificada la estructura del modelo general pasamos al análisis puntual para los coeficientes mensuales.

Para facilitar el análisis de las interrelaciones entre variables, nos planteamos para esta parte del trabajo la idea desde el principio de llegar a los algoritmos buscados mediante la regresión múltiple.

Ajuste de la función polinómica de grado cinco, en vías comerciales con peaje

Figura 13



Fijamos entonces nuestra variable dependiente Y para el valor del coeficiente buscado y una primera variable independiente X_1 para los meses del año.

Con éstas podemos construir el gráfico de la Figura 15, para analizar la relación existente entre ambas en función de nuestros datos.

Podemos deducir de esta gráfica que la nube de puntos podría ajustarse por una ecuación polinómica, pero es muy posible que el ajuste no sea bueno, debido a que la dispersión existente en cada valor de X_1 es alta. La inclusión de variables de entorno de la vía entonces puede que genere un modelo por regresión múltiple más ajustado.

Las nuevas variables a considerarse son:

- X_2 = urbanidad ($X_2 = 0$ rural, $X_2 = 1$ urbana)
- X_3 = uso ($X_3 = 0$ turística, $X_3 = 1$ comercial)
- X_4 = peaje ($X_4 = 0$ sin peaje, $X_4 = 1$ con peaje)
- X_5 = clasificación, expresado en % de autos.

Ajuste de la función obtenida, en vías comerciales sin peaje

Figura 14

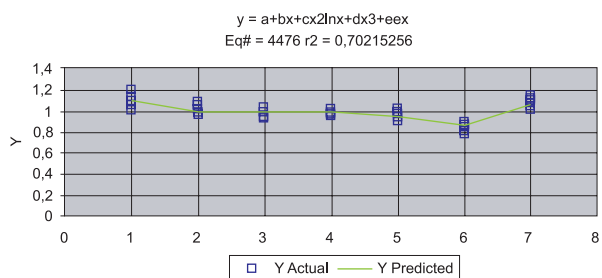
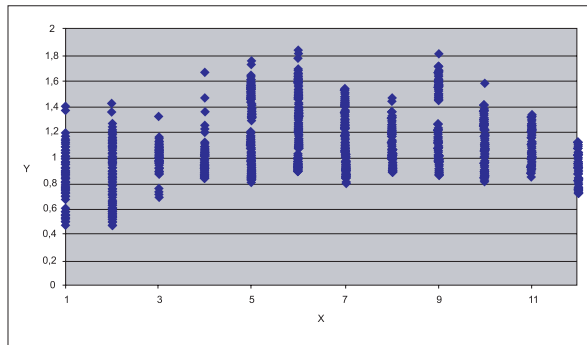


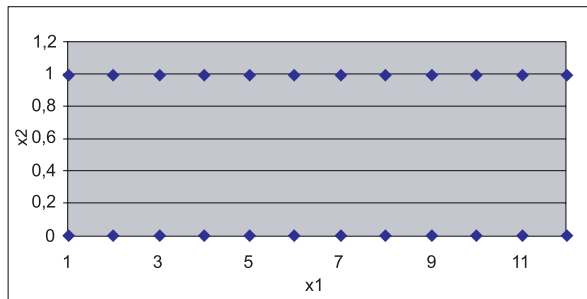
Figura 15 Gráfico de coeficientes mensuales vrs. mes del año



Previo a los análisis de regresión identifiquemos si existe multicolinealidad entre las variables propuestas, para esto podemos analizar el gráfico de dispersión matricial o, lo que es análogo, las relaciones existentes entre variables par a par. Para esto construimos los gráficos entre pares de variables y efectuamos los análisis correspondientes:

$-X_1$ vrs. $X_2 =$ Como X_1 representa los meses y contamos con series en forma equilibrada para ambiente urbano y rural, es de esperarse una gráfica como la obtenida en la Figura 16, en donde se evidencia la no existencia de una relación lineal.

Figura 16 Gráfico de X_1 vrs. X_2

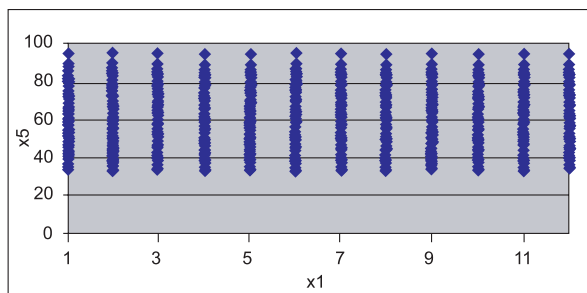


$-X_1$ vrs. $X_3 =$ Idem, pero comparadas las series en vías de uso comercial o turístico.

$-X_1$ vrs. $X_4 =$ Idem, pero comparadas las series en vías con o sin peaje.

$-X_1$ vrs. $X_5 =$ En este caso contamos con series para vías que presentan clasificaciones de autos y camionetas de entre un 30 a 100 %, barriendo por lo tanto un muy alto espectro, sin presentarse por supuesto relación entre variables, tal como se ve en la Figura 17.

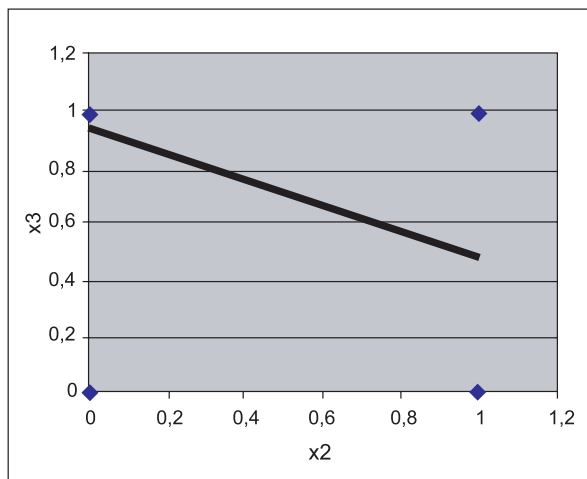
Figura 17 Gráfico de X_1 vrs. X_5



$-X_2$ vrs. $X_3 =$ Se trata de la comparación de dos variables binarias. Habría fuerte colinealidad si se agruparan los puntos exclusivamente en forma oblicua, es decir valores (0;0) con (1;1) o valores (0;1) con (1;0), o presentara pendiente muy pronunciada la correlación, lo cual no se registra, como se observa en la Figura 18.

$-X_2$ vrs. $X_4 =$ Idem.
 $-X_3$ vrs. $X_4 =$ Idem.

Figura 18 Gráfico de X_2 vrs. X_3



$-X_5$ vrs. $X_2 =$ Podemos observar en la Figura 19 como las series con las que se cuenta poseen sólo alta clasificación cuando la vía es urbana, lo que resulta en una forma de correlación.

$-X_5$ vrs. $X_3 =$ En este caso observamos en la Figura 20 sólo altas clasificaciones en las vías turísticas, resultando en una correlación.

$-X_5$ vrs. $X_4 =$ No se observa una correlación entre la clasificación de la vía y la existencia de peaje.

El análisis de las gráficas de relaciones entre variables, no hace más que ratificar lo que podemos deducir de

un estudio lógico. Es decir, es de esperarse que en vías de uso turístico sea muy alto el porcentaje de vehículos livianos particulares en relación con vehículos pesados de transporte de carga (aunque existan vehículos pesados de transporte de pasajeros, que no aparentan resultar de importancia), como así también es de esperarse que en vías urbanas la presencia de vehículos pesados sea muy reducida (nuevamente la presencia de vehículos pesados de transporte de pasajeros no aparenta influir). Todo esto claro, para los datos con los cuales contamos en este estudio. Esto nos lleva a descartar el empleo de la variable de clasificación, ya que en cierta forma es explicada por la inclusión de las demás variables de entorno.

Analizamos entonces la regresión lineal múltiple con las variables seleccionadas, pero esta nos da muy bajo ajuste.

Del análisis de su gráfica residuo vs. X_1 podemos deducir que la relación lineal entre Y y X_1 no es la más adecuada, análisis fundamentado en que X_1 es la variable independiente de significancia ($t = 7,09$ p -valor 0,0000). La otra variable de significancia es el uso ($t = -7,07$ p -valor 0,0000) frente a la urbanidad ($t = 1,51$ p -valor 0,13) y el peaje ($t = 1,74$ p -valor 0,0825).

Intentamos entonces la regresión múltiple con el modelo polinómico de dos variables explicativas (X_1 y X_3) de grado dos y linealizando, el cual tiene la forma:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_{1i} + \alpha_2 X_{2i} + \alpha_{12} X_{1i} X_{2i} + \alpha_{11} X_{1i}^2 + \alpha_{22} X_{2i}^2 + \varepsilon_i$$

El ajuste mejora con respecto a la regresión lineal múltiple, lo cual es previsible cuando se observa la relación entre la variable de significancia X_1 e Y . Observamos también que mayor grado en el polinomio sería adecuado, ya que el gráfico de residuos vs. X_1 nuevamente no muestra una nube de puntos aleatoria. En busca de mejores resultados, y en función del poder computacional del programa StatgraphicsPlus empleado, decidimos probar a continuación con un polinomio de grado tres de cuatro variables independientes (se agregan la urbanidad y peaje). Este análisis arroja como resultado:

-Ecuación del modelo ajustado:

$$Y = 0,479143985 + 0,136277392 X_1 + 0,059669021 X_2 + 0,523605787 X_3 - 0,009715863 X_1^2 + 0,034070315 X_1 X_2 - 0,152392231 X_1 X_3 + 0,045233251 X_1 X_4 - 0,000268142 X_1^3 - 0,000651558 X_1^2 X_2 + 0,014428784 X_1^2 X_3 - 0,000729828 X_1^2 X_4 - 0,175791796 X_2^2 X_4 - 0,040418127 X_1 X_2 X_3 + 0,010884546 X_1 X_2 X_4 - 0,040714787 X_1 X_3 X_4 + 0,114275601 X_2 X_3 X_4$$

Gráfico de X_2 vs. X_5

Figura 19

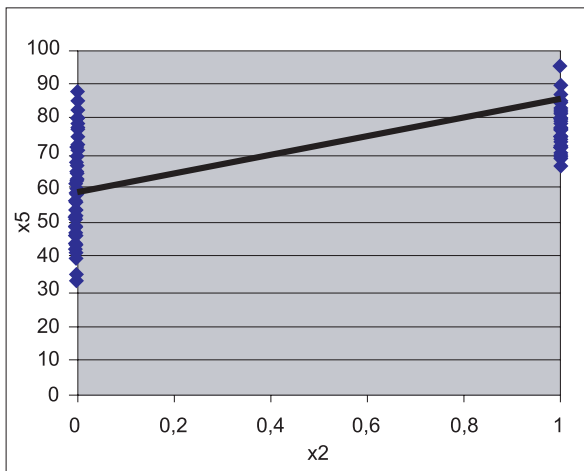
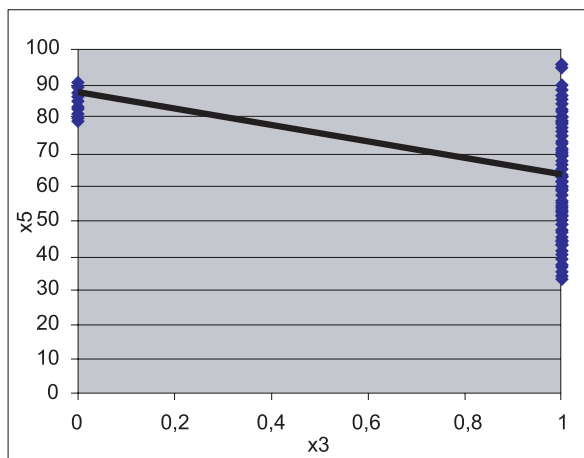


Gráfico de X_3 vs. X_5

Figura 20



- $R^2 = 0,66$
- R^2 ajustado = 0,65
- Error estándar de est. = 0,0745175
- Error absoluto medio = 0,0575518

Si bien el R^2 es menor a 0,7, umbral habitualmente empleado en análisis estadísticos, el valor de 0,66 alcanzado no es malo. Además podemos observar en la Figura 21 por fin una nube aleatoria de puntos en la gráfica de residuos vs. X_1 , indicando que no es necesario agregar un grado más a la ecuación, cosa que por otro lado resultaría poco práctico.

Entre los residuos se observan valores fuera del umbral de valor absoluto 2, pero estos son muy reducidos en comparación con el resto de los datos, e incluso su distribución resulta marcadamente normal como se observa en la Figura 22.

Figura 21 Gráfico de X_1 vs residuos de la regresión múltiple de grado tres

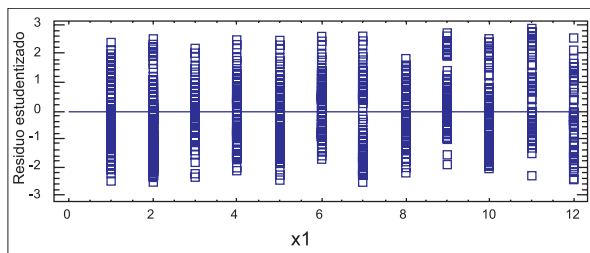
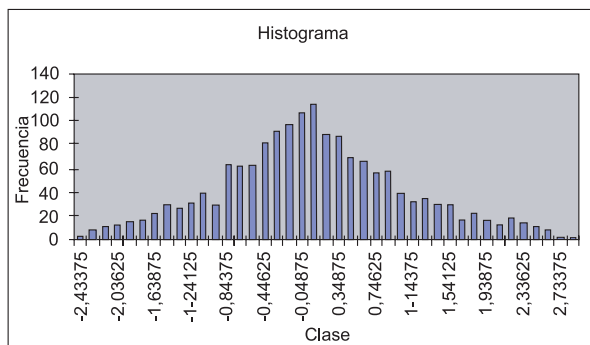


Figura 22 Histograma de residuos de la regresión múltiple de grado tres



Esta normalidad se ratifica cuando efectuamos su análisis estadístico, resultando:

- Media = -3,04137E-12
- Varianza = 1,0
- Asimetría tipificada = 2,07926
- Curtosis tipificada = -0,251034

Cuando efectuamos el cálculo de los coeficientes en función de este modelo, para ser presentados en una tabla, observamos valores comparables a los incluidos en la base de datos sobre la cual trabajamos, salvo en el caso de vías de uso turístico, ambiente rural y sin peaje, en donde los coeficientes obtenidos resultan muy pequeños. Al indagar por la causa de esta anomalía, descubrimos que para el estudio no se contó con series de datos en vías de estas características, hecho que evidentemente ha influido en la obtención de un modelo no aplicable en estos casos. Por tal razón no debemos considerar como válidos a los coeficientes para esa combinación de variables de entorno, quedando excluido el caso de los resultados.

3.3. Pasos para la aplicación de los modelos

Paso 1: Obtención del TD_{real} sobre la vía, considerado desde las 0 horas hasta las 24 horas. Indicar día de

la semana (DS), mes (M), uso de la vía (C), urbanidad (U) y existencia o no de peaje (P). En caso de posibilitarse sólo la realización de censos menores de 24 horas, extrapolar los resultados al TD mediante los lineamientos recomendados por la metodología FHA (Federal Highway Administration).

Paso 2: Establecer la tasa de crecimiento del tránsito estimada para la vía durante el año en estudio. Para esto realizar su estimación directa, o emplear el algoritmo o la Tabla 1 para su estimación mediante la variación del parque automotor durante el año en estudio y para la localidad en donde se encuentra el punto analizado.

Donde:

- TCT = Tasa crecimiento tránsito
- VP = Variación parque automotor

Paso 3: En función de la altura del año en la que se determina el TD_{real} y la TCT obtenida, descontar la tendencia en forma proporcional para establecer un TD_0 , con:

$$TD_0 = TD_{real} \times (1 - TCT \times \frac{DA}{365})$$

Donde:

- TD_0 = Tránsito diario sin tendencia
- TD_{real} = Tránsito diario directamente establecido
- TCT = Tasa de crecimiento del tránsito
- DA = Día del año del dato (1 para el 1° de enero, ..., 365 para el 31° de diciembre)

Paso 4: Determinar los coeficientes diarios empleando, en función de las variables de entorno, los modelos o la Tabla 2.

Paso 5: Determinar los coeficientes mensuales empleando, en función de las variables de entorno, el modelo o la Tabla 3. El modelo no es aplicable en vías turísticas rurales y sin peajes, para las cuales se recomienda el empleo del método clásico.

Paso 6: Calcular $TMDA$ mediante:

$$TMDA = TD_0 \times CD \times CM \times TCT$$

En caso de contarse con más datos de tránsitos diarios, aplicar la metodología y calcular la estadística de los resultados obtenidos para convalidar o no la media de estos mediante la normalidad de los resultados.

3.4. Validación y discusión

Los modelos obtenidos han sido validados en diversas vías con las distintas tipologías de los condicionantes de borde, obteniéndose resultados comparables, o incluso mejores, que con la metodología clásica que emplea censos de cobertura, sumado a esto el hecho de la disminución de subjetividad en la elección de los coeficientes de corrección.

Los modelos también han sido discutidos con métodos alternativos para la obtención de los coeficientes, como por ejemplo por cálculo de valores medios según la tipología de la vía, resultando nuevamente en este caso la metodología con bondades comparables o superiores a las de estas alternativas.

Tasa de crecimiento de tránsito en función del registro automotor

Tabla 1

VP	TCT
0,5	-10,0
1,0	-5,5
1,5	-4,2
2,0	-4,4
2,5	-3,7
3,0	-2,3
3,5	-0,5
4,0	1,3
4,5	3,1
5,0	4,8
5,5	6,4
6,0	7,9
6,5	9,3
7,0	10,5
7,5	11,7
8,0	12,7
8,5	13,7
9,0	14,6
9,5	15,5
10,0	16,2

Coefficientes de corrección diarios

Tabla 2

USO	PEAJE	COEFICIENTE DIARIO						
		DOM	LUN	MAR	MIE	JUE	VIE	SAB
turístico	con o sin peaje	0,772	1,004	1,149	1,207	1,177	1,059	0,855
comerc	sin peaje	1,095	1,001	1,000	1,008	0,955	0,866	1,061
comerc	con peaje	1,336	1,151	0,969	0,937	0,924	0,845	1,005

Coefficientes de corrección mensuales

Tabla 3

USO	URB	PEAJE	COEFICIENTE MENSUAL											
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
turístico	rural	sin	caso no aplicable											
turístico	rural	con	0,650	0,798	0,922	1,021	1,092	1,134	1,146	1,125	1,071	0,982	0,855	0,690
turístico	urb	sin	0,991	0,987	0,990	0,997	1,006	1,018	1,029	1,038	1,044	1,045	1,039	1,025
turístico	urb	con	0,995	0,993	0,997	1,003	1,011	1,019	1,025	1,028	1,026	1,017	1,000	0,974
comercial	rural	sin	0,699	0,836	0,949	1,037	1,098	1,130	1,131	1,101	1,037	0,937	0,801	0,627
comercial	rural	con	0,578	0,769	0,935	1,074	1,184	1,264	1,313	1,327	1,307	1,250	1,154	1,019
comercial	urb	sin	1,044	1,032	1,024	1,020	1,018	1,016	1,012	1,005	0,994	0,976	0,950	0,914
comercial	urb	con	0,997	0,998	1,002	1,009	1,015	1,021	1,023	1,020	1,012	0,995	0,969	0,933