

Tratamiento estadístico de los modelos intensidad-velocidad en carreteras convencionales



Miguel Núñez Fernández
*Jefe Servicio de Planificación II,
D. G. Carreteras,
Comunidad de Madrid.*
Manuel G. Romana
*Profesor Titular de Universidad,
Departamento Ingeniería Civil:
Transportes, U.P.M.*

Resumen

Existen diversos métodos y manuales que establecen diferentes modelos para estudiar la circulación, la capacidad de la vía, etc. El Manual de Capacidad 2000 propone la medida de los niveles de servicio para carreteras de dos carriles a partir de la velocidad media de recorrido y del porcentaje de tiempo siguiendo, representando la función intensidad-velocidad mediante rectas de pendiente constante.

Se ha comprobado experimentalmente que la aplicación de la relación propuesta en la última edición del Manual de Capacidad en las carreteras convencionales reales de dos carriles en la Comunidad de Madrid se aleja de la realidad y con ella la interpretación que se debe hacer sobre los niveles de servicio en este tipo de carreteras.

El resultado de una investigación realizada en carreteras de la Comunidad de Madrid, y en colaboración con la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, ha sido el planteamiento de un modelo macroscópico que reproduce la función intensidad-velocidad en carreteras convencionales, con una metodología que puede ser reproducible, de manera sencilla, para obtener leyes específicas en otras carreteras concretas.

Estos modelos han sido validados mediante estadísticos de fuerza y con la diagnosis de los mismos.

PALABRAS CLAVE: carreteras convencionales, modelos estadísticos, relación intensidad-velocidad, Manual de Capacidad.

Introducción

La cuarta y última edición del Manual de Capacidad publicado en 2000 por *National Research Council* de EE.UU. plantea las relaciones intensidad-velocidad mediante un modelo de regresión simple de rectas paralelas ($y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$) de pendiente constante, igual a $-0,0125$ km/h por cada vehículo que viaja por la carretera, en uno u otro sentido. La simplicidad de este modelo,

que no recoge las particularidades detectadas en los aforos realizados y que no es capaz de explicar los diferentes modos de circulación, deriva en la imposibilidad de la aplicación directa del Manual de Capacidad 2000, ni del futuro Manual de Capacidad 2010 que mantiene la metodología del planteamiento, a las carreteras convencionales de la Comunidad de Madrid.

Con ello, el objeto principal de una investigación realizada en carreteras de la Comunidad de Madrid, y en colaboración con la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, es proponer un modelo alternativo válido al modelo de regresión simple propuesto en esta edición del Manual, que reproduzca la relación intensidad-velocidad en tramos específicos de carreteras convencionales de dos carriles en la Comunidad de Madrid.

Para mejorar el modelo lineal planteado en el Manual de Capacidad se ha ajustado el conjunto de datos a un modelo de regresión múltiple polinomial, en el que la variable y_i (velocidad) se determina con potencias de una única variable independiente x_i (intensidad),

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_n x_i^n + \varepsilon_i \quad (1)$$

Donde,

- $\beta_0 \dots \beta_n$, representan los coeficientes de regresión.
- ε_i , representa los errores del modelo para cada y_i , los cuales son aleatorios e independientes; todos los errores tienen media 0, tienen la misma varianza σ^2 y están distribuidos normalmente.

Para estudiar la idoneidad del modelo lineal simple planteado por el Manual de Capacidad, así como el modelo de regresión múltiple polinomial de diferentes órdenes que se propone, se han analizado diferentes estadísticos de fuerza, entre ellos y principalmente, el coeficiente de determinación (R^2), que representa el cuadrado del coeficiente de correlación (r), el cual per-

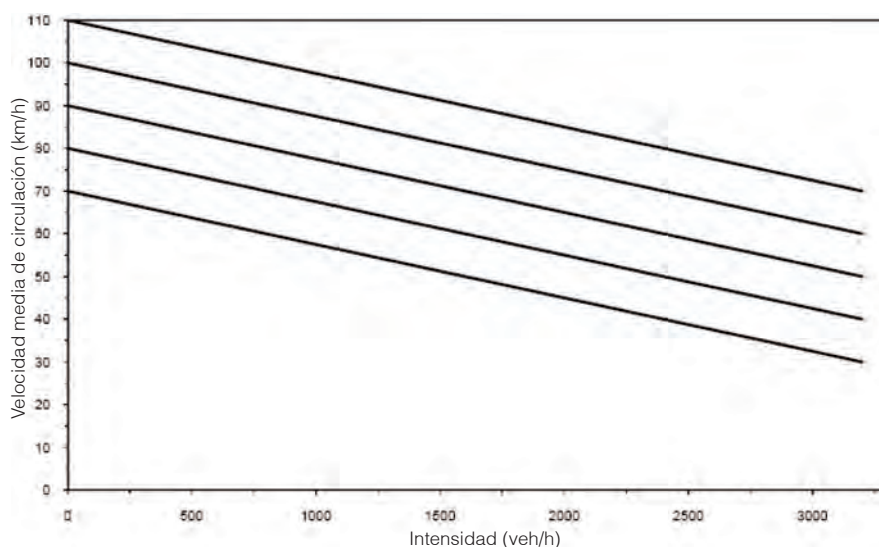


Figura 1. Relación intensidad-velocidad media de circulación para carreteras de dos carriles en condiciones ideales. Fuente: *Transportation Research Board* (2000)

mite medir numéricamente la consistencia de la relación entre las variables intensidad y velocidad,

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2]}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2} \quad (2)$$

Donde,

- y_m , representa la media de la muestra.
- $\hat{y}_i$, representa el valor ajustado y pronosticado con el modelo planteado, el cual difiere del valor real observado y_i una cantidad denominada residuo (e).

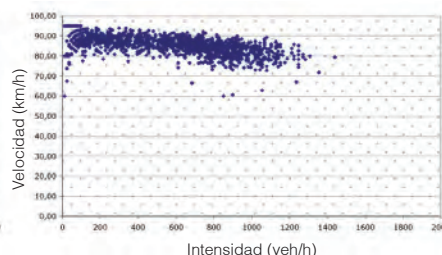
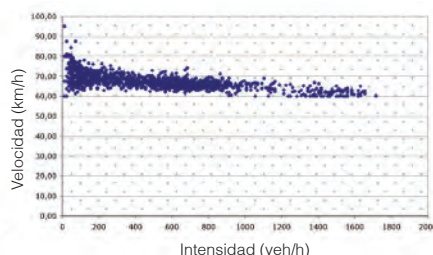
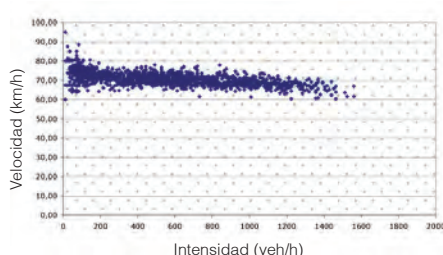
El coeficiente de determinación mide, tanto en la regresión lineal simple como en la regresión múltiple, la bondad del ajuste del modelo planteado. Un estadístico de bondad del ajuste mide lo adecuado que es un modelo al explicar un conjunto específico de datos, al cuantificar la reducción en la dispersión de los puntos obtenidos usando mínimos cuadrados y al expresar esta reducción como una proporción de la dispersión. Se ha empleado el coeficiente de determinación como estadístico comparativo entre ambas regresiones al ser un coeficiente análogo en ambas.

Los estadísticos más empleados en la

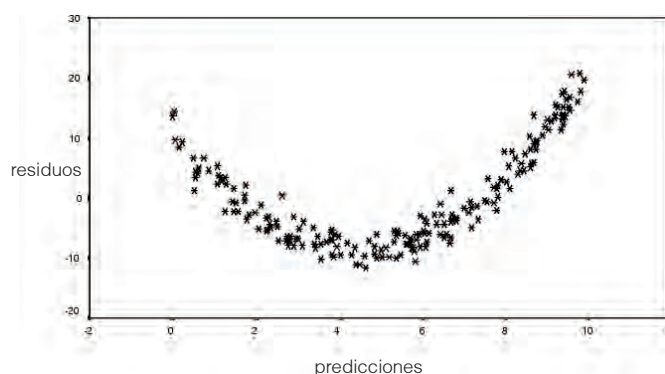
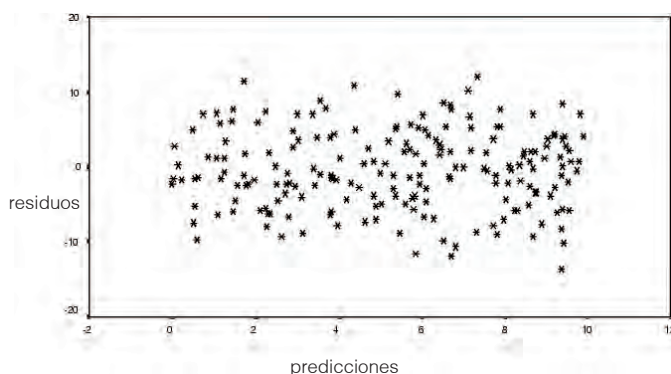
regresión múltiple, junto con el coeficiente de determinación (R^2), son el estimador de la varianza del error (s^2), que se emplea para establecer los intervalos de confianza de los modelos, y el estadístico F , que se emplea para determinar estadísticamente las variables y grados por eliminar.

Todos los estadísticos de fuerza (R^2 , tabla ANOVA¹, de *t-Student*, *Durbin-Watson*, etc.) se comprueban mediante la realización de una prueba de hipótesis, donde se define la hipótesis nula que se da por verdadera, H_0 , y la hipótesis alternativa, H_1 . Para comprobar la hipótesis nula, H_0 , de los distintos estadísticos de fuerza se emplea el nivel de significación observado valor P como probabilidad de que H_0 sea verdadera. Esta prueba de hipótesis implica medir la fuerza del desacuerdo entre la muestra y H_0 , es decir su capacidad para producir un número entre 0 y 1. Cuanto menor sea el valor P más fuerte será la evidencia en contra de H_0 , pudiendo abandonar tal suposición y dando por verdadera la hipótesis alternativa H_1 . Es decir, el valor P o nivel crítico es la probabilidad de obtener una

(1) Análisis OF VARIance, análisis de la varianza.



Figuras 2a a 2c. Representación de los datos intensidad – velocidad recogidos en diferentes tramos aforados. Fuente: Elaboración propia



Figuras 3a y 3b. Hipótesis homocedasticidad y linealidad. Gráfico de residuos frente a predicción y gráfico de residuos frente a variable regresora.

discrepancia mayor que la observada en la muestra.

En el problema de la selección del modelo se debe tener en cuenta el principio básico de la navaja de Occam, que enuncia que el mejor modelo científico es el modelo más simple que explica los hechos observados, lo que implica el principio de parcidad, es decir, que un modelo debe contener el menor número de variables necesarias para ajustar los datos, con las siguientes excepciones:

- Un modelo lineal debe contener un término independiente; en el modelo planteado coincidirá con la velocidad libre de partida.
- Si una potencia x^n de una variable se incluye en un modelo, también estarán incluidas todas las potencias inferiores $x^2, \dots, x^{n-1}$.

Para establecer el orden de la regresión polinomial más adecuado se debe comprobar la mejora de aproximación entre los distintos grados de la función mediante el coeficiente de determinación y el incremento de este coeficiente con respecto al orden anterior, de manera que se pueda establecer cuantitativamente la mejora que supone el incremento de un orden en el modelo. Una vez que se han determinado los modelos que se consideran más adecuados como funciones de aproximación y representatividad de los datos recogidos, se debe realizar la diagnosis del modelo elegido y comprobar el cumplimiento de las diferentes hipótesis.

En el caso de la investigación, y analizando los estadísticos de fuerza principales calculados con el software Statgraphics Plus 5.1, se concluye que el modelo que mejor reproduce la relación intensidad-velocidad en los diferentes tramos de carreteras

de dos carriles estudiados, para todo el rango de intensidades, es un modelo de regresión múltiple polinomial de orden 3, frente al modelo de regresión simple propuesto por el Manual de Capacidad 2000.

Diagnosis de los modelos: contraste de hipótesis

Se deben contrastar las hipótesis del método empleado, que en el caso de la investigación realizada es la aplicación de un modelo de regresión múltiple polinomial de orden 3 para representar la relación intensidad-velocidad de los vehículos ligeros sin influencia de vehículos pesados, considerando todo el rango de intensidades, de 0 veh/h hasta la intensidad máxima registrada. Para ello se debe comprobar si se cumplen las hipótesis de normalidad, homocedasticidad, linealidad e independencia.

Comprobación de la hipótesis de homocedasticidad

La hipótesis de homocedasticidad implica que la varianza es constante para todo i (no depende de i), $Var(\epsilon_i) = \sigma^2 = cte$, lo cual se comprueba mediante el gráfico de residuos estudentizados² e_i frente a las predicciones de la intensidad y , mediante el gráfico de residuos estudentizados e_i frente a la variable regresora de la velocidad.

La hipótesis quedaría demostrada con la homogeneidad de la varianza, lo que gráficamente se traduciría a que la nube de puntos del gráfico fuese un conjunto de números aleatorios, es decir, que no se observase ninguna tendencia en los puntos, y por tanto que su ajuste a una curva no fuese posible.

Comprobación de la hipótesis de linealidad

La hipótesis de linealidad se comprueba gráficamente mediante una gráfica de los residuos en función de la variable independiente; por otro lado, esta gráfica también determina cuándo la varianza de los residuos es constante (hipótesis de homocedasticidad) y detecta la presencia de autocorrelación de los residuos.

El modelo planteado será válido cuando la gráfica no indique un patrón importante, sin curva, y cuando la dispersión vertical de los puntos no varíe demasiado la dispersión horizontal de la gráfica, excepto cerca de los bordes donde sí puede ser asumible, siendo, por tanto, homocedástico.

El gráfico de la figura 3a muestra la no linealidad, así como la homocedasticidad entre la variable independiente y la dependiente, sin tendencia en los puntos. Por otro lado, en la figura 3b se puede observar una tendencia en los residuos comprometiendo el cumplimiento de ambas hipótesis.

Comprobación de la hipótesis de normalidad

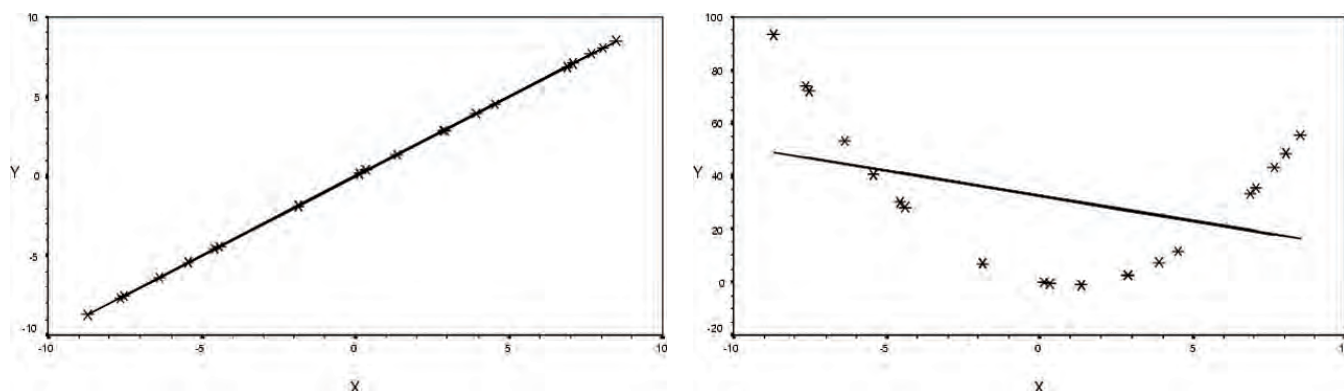
Una hipótesis básica es que los errores del modelo sigan una distribución normal; y para ello se debe contrastar la hipótesis que confirme que los residuos estudentiza-

(2) Son los residuos (ordinarios: diferencia entre la observación y la predicción) con un tratamiento determinado de manera que se puedan identificar todas las observaciones aunque los residuos sean grandes, lo cual se deduce cuando $\sigma^2(e_i)$ no es constante.

Si es grande los residuos estudentizados tienen media cero y varianza próxima a 1, permitiendo distinguir claramente los residuos grandes.

Determinación de los residuos estudentizados:

$$t_i = \frac{e_i}{s_{R(i)} \sqrt{1 - h_{ii}}}, \quad i = 1, \dots, n.$$



Figuras 4a y 4b. Hipótesis Normalidad. Gráfico de la probabilidad normal de los residuos

dos e_i provienen de una distribución normal. La normalidad se puede estudiar mediante diversas técnicas, entre otras:

- Gráfica de la probabilidad normal de los residuos: sirve para comprobar que los errores están normalmente distribuidos, lo cual se verifica si la apariencia de su representación es la de una línea recta.
- Histogramas con distribuciones en forma de campana de Gauss.
- Contraste numérico de Kolmogoroff-Smirnov: mide el ajuste entre la función de distribución empírica de una muestra y la función de distribución teórica.

El gráfico de la probabilidad normal de los residuos representado en la *figura 4a* muestra una distribución de datos que se ajustan, razonadamente, a una distribución normal; por el contrario el gráfico de la *figura 4b* muestra una variabilidad importante en este aspecto, lo que plantearía la duda sobre el cumplimiento de la hipótesis de normalidad.

El histograma planteado en la *figura 5a* obedece a una distribución normal, lo que permitiría dar por buena la hipótesis de la normalidad; sin embargo la *figura 5b* muestra una distribución de histogramas de fre-

cuencias con una distribución de datos que difiere de una normal. La falta de normalidad puede ser motivada por un conjunto pequeño de observaciones atípicas que originan apuntamiento o la existencia de una variable cualitativa oculta que hace que la distribución sea multimodal.

Comprobación de la hipótesis de independencia

La consideración que las observaciones muestrales son independientes es una hipótesis básica de los modelos de regresión, entendiéndose con ello que los errores son variables aleatorias independientes.

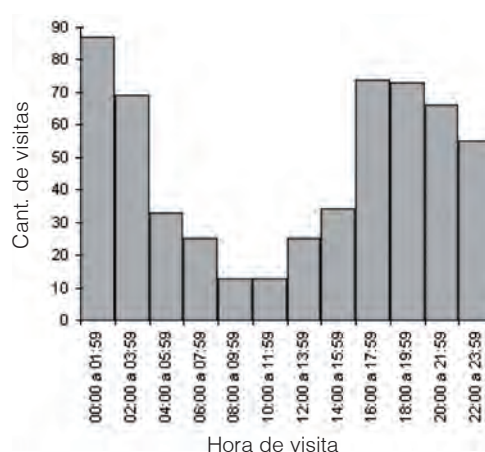
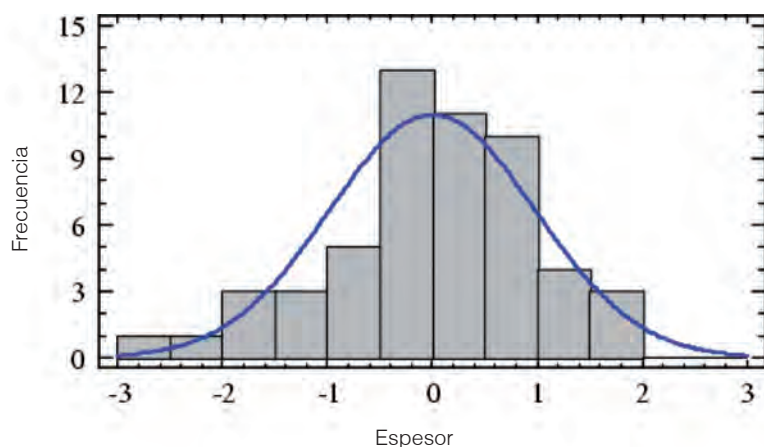
Númericamente se puede comprobar mediante el estadístico Durbin-Watson, diseñado para detectar residuos en un modelo de regresión que tenga un coeficiente de autocorrelación intermedio. Este estadístico experimental tomará valores entre 0 y 4, de tal modo que cuanto más próximo a cero (cuatro) sea el valor estadístico mayor es la evidencia de autocorrelación positiva (negativa). Si el valor del estadístico experimental es dos, entonces la correlación experimental será nula y por tanto no se

detectará un problema de autocorrelación entre las perturbaciones. El límite superior d_u y el límite inferior d_l intermedios se determinan en función del tamaño de la muestra y del número de regresores del modelo o número de variables (intensidad).

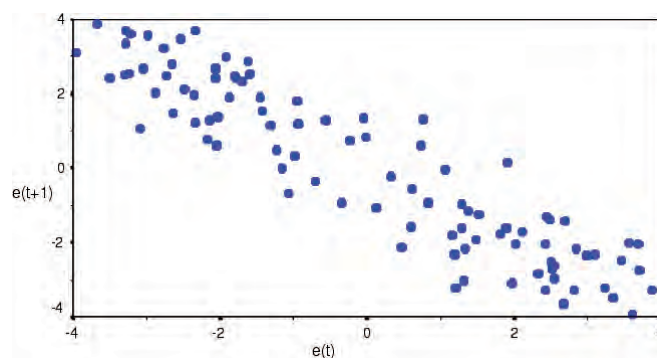
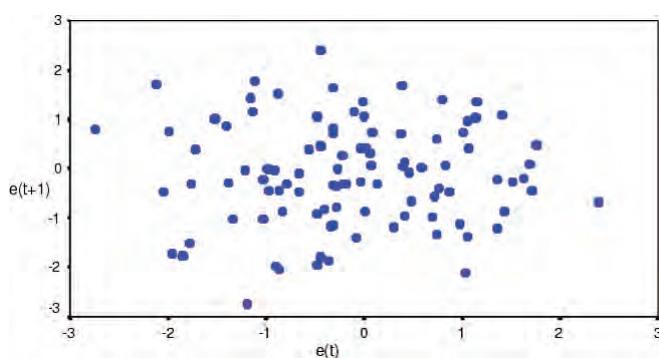
Las tablas originales de Durbin-Watson se propusieron para muestras entre 15 y 100 observaciones y un número máximo de 5 observadores. White [X] publicó en 1977 unas tablas más completas que incluyen tamaños de muestra de hasta 200 observaciones. En esta investigación, a pesar de que el número de observaciones es muy superior, se emplea el número máximo de observaciones de las tablas de White. De este modo $d_u = 1,664$ y $d_l = 1,684$. Por otro lado, en caso de detectarse un problema de autocorrelación y se quisiera modelar, se tendría que recurrir a unos modelos ARI-MA³ de series temporales.

Debido a que el número de observaciones en la investigación realizada es muy elevado se ha completado el análisis de la hipótesis de independencia de manera

(3) ARIMA: AutoRegressive Integrated Moving Average, modelo autorregresivos integrado de media móvil.



Figuras 5a y 5b. Hipótesis Normalidad. Histogramas



Figuras 6a y 6b. Hipótesis Independencia. Gráfico de residuos frente a número de fila

gráfica. Un método gráfico para detectar y confirmar esta hipótesis son los gráficos de residuos frente a número de orden de las observaciones de la variable dependiente velocidad. La falta de autocorrelación se obtendría si la nube de puntos del gráfico fuese un conjunto de números independientes e idénticamente distribuidos, *iid*, sin tendencia en los puntos y sin la posibilidad de ajuste mediante curvas.

Los puntos del gráfico de la figura 6a tienen una distribución aleatoria de orden que certifica la inexistencia de autocorrelación en los residuos. Por otro lado, en la figura 6b los puntos no se distribuyen aleatoriamente: en este caso siguen una tendencia cúbica, por lo que se podría afirmar la falta de independencia del modelo propuesto.

Diagnóstico del modelo de regresión múltiple polinomial de orden 3

Para comprobar la validez del modelo de regresión múltiple polinomial de orden 3 propuesto para la relación intensidad-velocidad en carreteras convencionales se debe analizar la diagnosis del mismo para

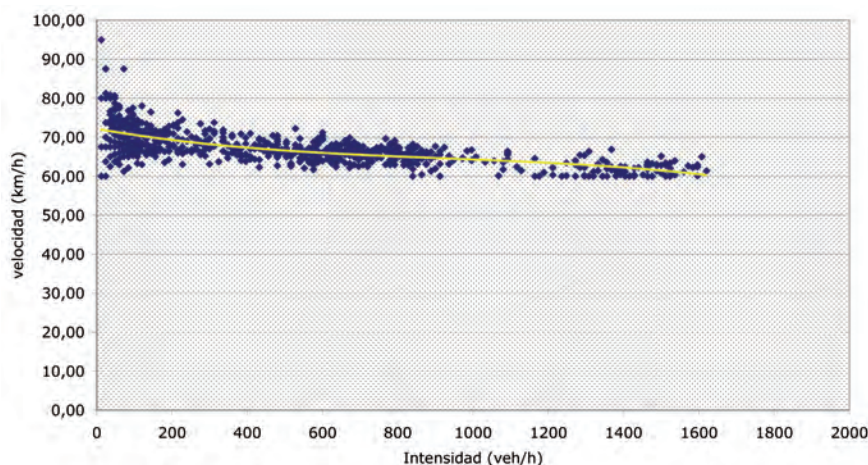


Figura 7. Relación intensidad - velocidad. Carretera M-509. Tramo: M-851 – Villanueva del Pardillo. Sentido hacia Madrid

un tramo de carretera específico. Se incluyen los parámetros comprobados en uno de los tramos analizados en la investigación, concretamente el tramo de la carretera M-509, sentido hacia Madrid.

En la tabla 1 se recogen los estadísticos obtenidos mediante el programa estadístico Statgraphics Plus 5.1.

Dado que el valor P de la tabla ANOVA es inferior a 0,01 se comprueba estadísticamente que existe una relación significativa entre velocidad e intensidad para un nivel de confianza del 99%. El valor P del estadístico T-Student relativo al término de ma-

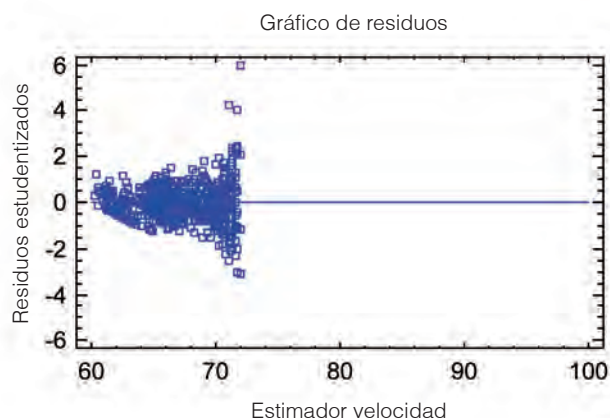
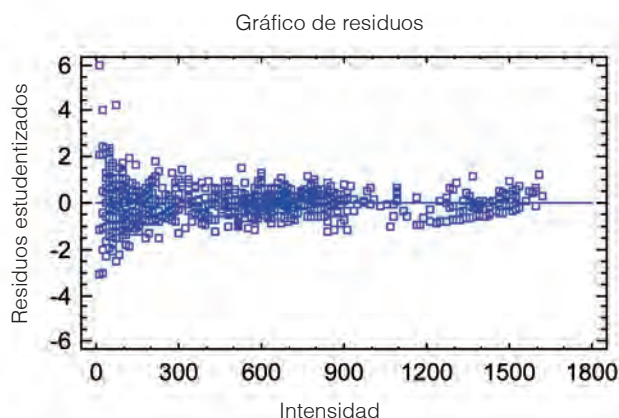
yor orden, x^3 , determina que este término es estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 95%, por lo que no sería conveniente considerar ningún modelo de orden más bajo.

La comprobación de la linealidad del modelo se realiza mediante el gráfico de residuos estudentizados frente a la predicción de la intensidad, y para comprobar la homocedasticidad, además de la anterior, se estudia la gráfica de residuos estudentizados en función de la variable regresora de la velocidad (figuras 8a y 8b). En este caso, la gráfica de residuos en función de la predicción de la intensidad representa una nube de puntos aleatorios sin observar tendencia alguna ni posibilidad de ajustar a ninguna curva, por lo que se puede dar por válida la hipótesis de linealidad.

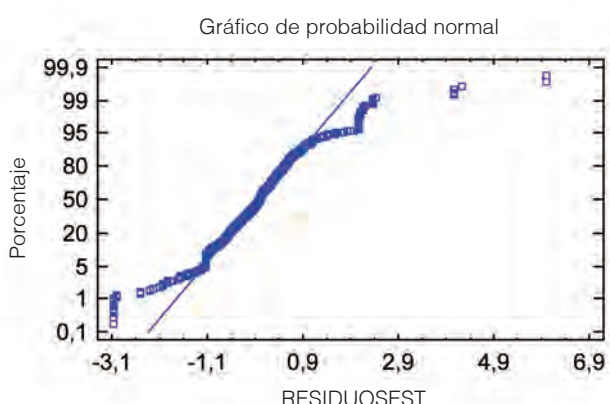
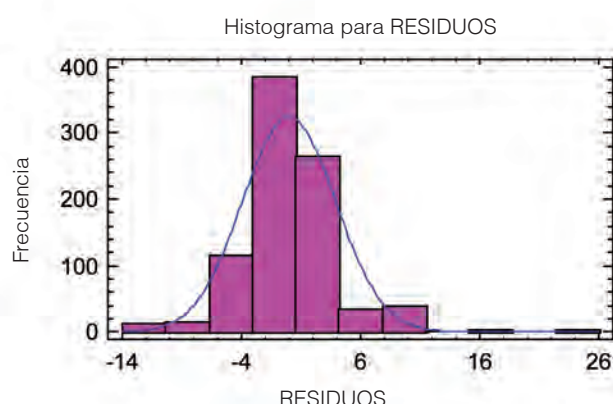
Por otro lado, en la gráfica en función de la variable regresora no se puede dar por válida la hipótesis de homocedasticidad para el modelo planteado, ya que en la zona de los bordes la hipótesis tiende hacia la heterocedasticidad; estas zonas coinciden en la toma de datos y se corresponden con aquellos usuarios que circulan a la velocidad deseada, circulación libre, ya que

Tabla 1. Estadísticos obtenidos. Contraste de hipótesis para el modelo regresión múltiple polinomial intensidad - velocidad. Carretera M-509. Tramo: M-851 – Villanueva del Pardillo. Sentido hacia Madrid

Carretera	M-509
Tramo / Sentido	M-851 – Villanueva del Pardillo / Sentido Madrid
Modelo	Modelo regresión múltiple polinomial de orden 3
Relación intensidad-velocidad	$y = -5 \cdot 10^{-9} x^3 + 1 \cdot 10^{-5} x^2 - 0,0168 x + 72,143$
Estadístico	Valor
Coeficiente de determinación R^2	0,39
T-Student, valor P del término x^3	0,0157
Durbin-Watson	1,67
Valor medio de los residuos	2,70
Kolmogorov-Smirnov, bondad de ajuste de residuos	0,091



Figuras 8a y 8b. Hipótesis Homocedasticidad y Linealidad. Gráfico de residuos frente a predicción intensidad y frente a variable regresora velocidad



Figuras 9a y 9b. Hipótesis Normalidad. Histograma de residuos con distribución normal y Gráfico de probabilidad normal de residuos

no tienen las restricciones de intensidad, al ser ésta baja, $I < 200 \text{ veh/h}$.

La comprobación de la normalidad se estudia mediante el ajuste a una distribución normal de los residuos estudentizados; en este caso, se comprueba visualmente que el histograma de frecuencias no se ajusta perfectamente a una distribución normal (figura 9a). Por otro lado, en el gráfico de probabilidad normal se aprecian diferencias con la línea recta en las colas, lo que se

corresponde con la zona heterocedástica comentada, ya que en la zona central los puntos se ajustan a una recta; por lo que, y teniendo en cuenta esta salvedad, se puede dar por válida la hipótesis de normalidad (figura 9b).

El estadístico Durbin-Watson es 1,67 por lo que se clasifica en la zona de indecisión entre los límites d_u y d_L , manejando las tablas de White y Savin de hasta 200 observaciones; por lo que puede haber indicio de correlación de serie; para confirmar este aspecto se debe examinar el gráfico de residuos frente al número de orden.

Gráficamente se comprueba la falta de tendencia en los puntos representados en el gráfico de residuos frente a número de orden, así como la imposibilidad de ajuste a ninguna curva, por lo

que se puede dar por válida la hipótesis de independencia.

Mediante el contraste de hipótesis de estadísticos y gráficos realizado se concluye que el modelo planteado para la representación de la relación intensidad-velocidad en el tramo de carretera analizado presenta problemas de heterocedasticidad para un rango de intensidades concretas y localizadas. Para depurar este modelo se analizará el rango de intensidades donde se haya eliminado aquellas que provocan, a priori, el incumplimiento de las diferentes hipótesis (intensidades inferiores a 200 veh/h).

Diagnosis del modelo de regresión múltiple polinomial de orden 2

Por otro lado, en la investigación se comprueba en todos los tramos analizados, independientemente de las características particulares de cada uno, o del entorno donde se encuadran, que la relación intensidad-velocidad para intensidades superiores

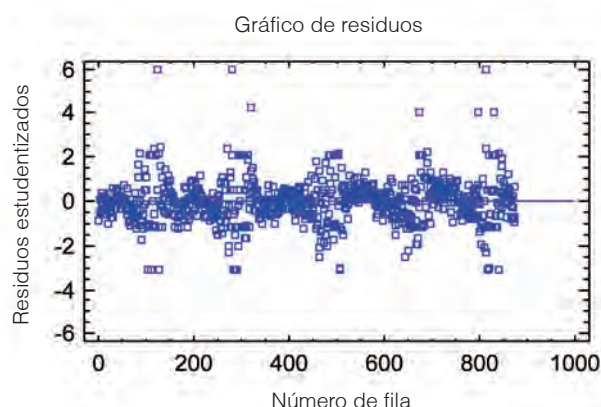


Figura 10. Hipótesis Independencia. Gráfico de residuos frente a número de fila.

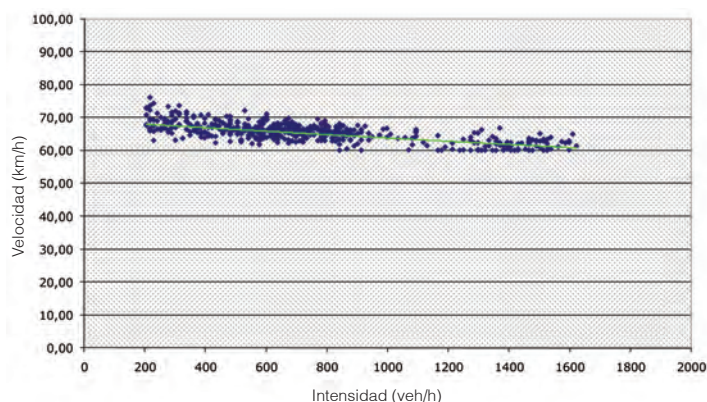


Figura 11. Relación intensidad - velocidad. Carretera M-509. Tramo: M-851 - Villanueva del Pardillo. Sentido Madrid. Intensidades > 200 veh/h

a $I > 200 \text{ veh/h}$ quedaría definida con la misma exactitud mediante un modelo de regresión múltiple polinomial de grado 2. De este modo, y atendiendo al principio estadístico de la navaja de Occam y al principio de parsimonia, se determina que el mejor modelo que explica la relación intensidad-velocidad en condiciones ideales de circulación con intensidades superiores a 200 veh/h es un modelo de regresión múltiple polinomial de orden 2; sobre el que se realizará una nueva diagnosis.

que existe una relación significativa entre velocidad e intensidad para un nivel de confianza del 99%. Señalar que el coeficiente de determinación obtenido en el modelo de regresión polinomial de orden 2 es superior al de orden 3 en un 10%, y en 13% con respecto al obtenido para el modelo de regresión simple propuesto por el Manual de Capacidad 2000 (0,36). El valor P del estadístico T-Student relativo al término de mayor orden, x^2 , determina que este término es estadísticamente significativo para un

En la *tabla 2* se recogen los estadísticos obtenidos mediante el programa estadístico Statgraphics Plus 5.1.

Dado que el valor P de la *tabla ANOVA* es inferior a 0,01 se comprueba estadísticamente

nivel de confianza del 95%, por lo que no sería conveniente considerar ningún modelo de orden más bajo.

La linealidad y homocedasticidad del modelo queda comprobada mediante el gráfico de residuos estudentizados frente a predicción intensidad y el gráfico de residuos estudentizados frente a variable regresora velocidad (*figuras 12a y 12b*) ya que la dispersión vertical no varía a lo largo de la longitud horizontal en ambas gráficas y no se observa tendencia alguna ni posibilidad de ajustar a ninguna curva.

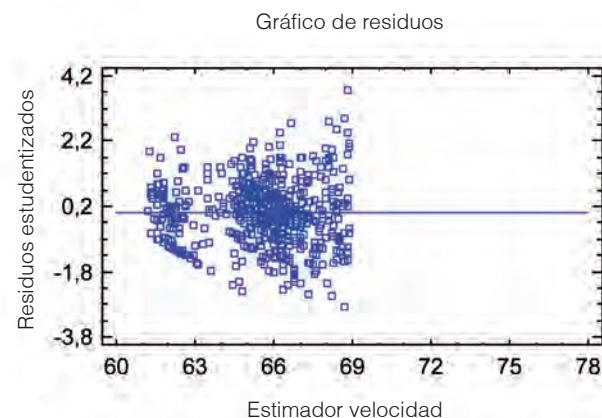
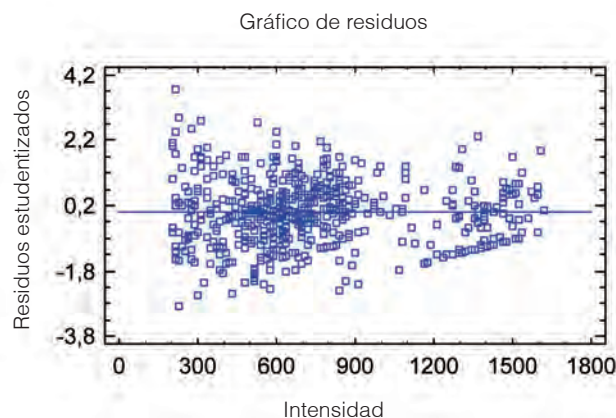
Señalar que el tramo de dispersión en la gráfica de residuos frente a la predicción de la velocidad, que aparecía al considerar toda la intensidad (*figura 8a*) desaparece con $I > 200 \text{ veh/h}$ y no se reproduce en ningún punto a lo largo de la longitud horizontal, ya que era una particularidad de una intensidad determinada no reproducible en ningún otro momento de la circulación; lo que apoya aún más la validez de las hipótesis de homocedasticidad y linealidad de los modelos presentados, tanto de orden 3 para toda la intensidad, como de orden 2 para el intervalo estudiado.

Se da por válida la hipótesis de normalidad al comprobar el ajuste a una distribución normal de los residuos estudentizados mediante el histograma de frecuencias, el cual se ajusta a una distribución normal, y el gráfico de normalidad donde no se aprecian prácticamente diferencias entre este y la línea recta, ya que los puntos se ajustan a ésta.

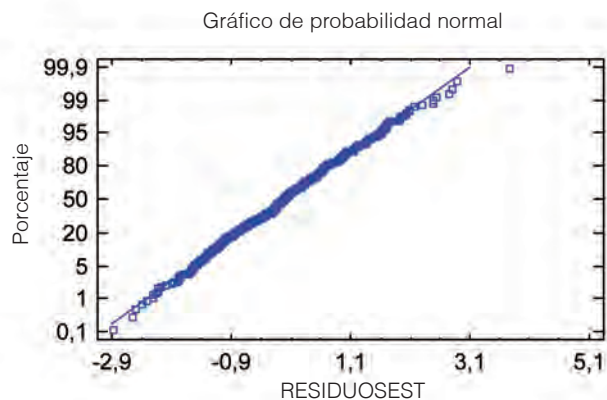
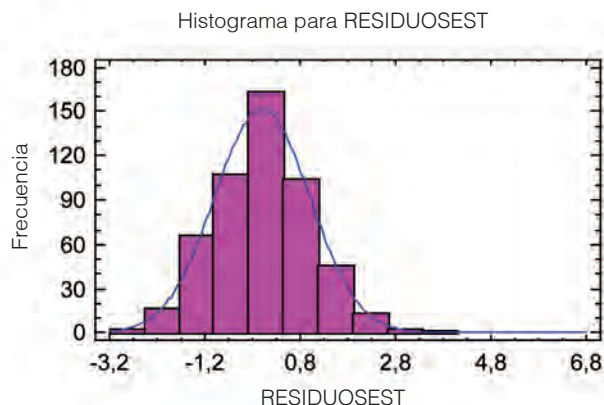
El estadístico Durbin-Watson es 1,24 y el valor P del estadístico de Durbin-Watson es inferior a 0,05 lo que señala que puede haber indicio de correlación de serie por el

Tabla 2. Estadísticos obtenidos. Contraste de hipótesis para el modelo regresión múltiple polinomial intensidad - velocidad. Carretera M-509. Tramo: M-851 - Villanueva del Pardillo. Sentido hacia Madrid. Intensidades > 200 veh/d

Carretera		M-509
Tramo / Sentido		M-851 - Villanueva del Pardillo / Sentido Madrid
Modelo		Modelo regresión múltiple polinomial de orden 2
Relación intensidad-velocidad		$y = 1 \cdot 10^{-6} x^2 - 0,0077 x + 70,412$
Estadístico	Valor	
Coeficiente de determinación R^2	0,49	
T-Student, valor P del término x^2	0,045	
Durbin-Watson	1,24	
Valor medio de los residuos	1,58	
Kolmogorov-Smirnov, bondad de ajuste de residuos	0,032	



Figuras 12a y 12b. Hipótesis homocedasticidad y linealidad. Gráfico de residuos frente a predicción intensidad y frente a variable regresora velocidad



Figuras 13a y 13b. Hipótesis Normalidad. Histograma de residuos con distribución normal y Gráfico de probabilidad normal de residuos

alto número de observaciones; para confirmar este aspecto se examina el gráfico en función del número de orden del modelo. Gráficamente se comprueba la falta de tendencia alguna en los puntos representados en el gráfico de residuos frente a número de orden, así como la imposibilidad de ajuste a ninguna curva, por lo que se puede dar por válida la hipótesis de independencia.

Mediante la diagnosis de estadísticos y gráficos se comprueba que la representación de la relación intensidad-velocidad en las carreteras convencionales de dos carriles en la Comunidad de Madrid considerando vehículos ligeros sin influencia de pesados y para intensidades superiores a 200 veh/h mediante un modelo de regresión múltiple polinomial de orden 2 cumple las condiciones de linealidad, normalidad, independencia y mejora de la homocedasticidad con respecto a un modelo de orden 3 para todo el rango de intensidades.

Conclusiones

Se comprueba que el modelo de regresión múltiple polinomial de orden 3 con intensidades bajas, concretamente para valores inferiores a 200 veh/h, tiende a la heterocedasticidad, explicable por la circulación libre de la zona, donde la divergencia en el patrón de velocidad es debido al factor humano, ya que los usuarios pueden circular a la velocidad que deseen, sin otros condicionantes que provocan un encauzamiento más homogéneo de la misma con intensidades más elevadas.

Por otro lado, la relación intensidad-velocidad en carreteras convencionales de dos carriles en la Comunidad de Madrid en condiciones ideales para un intervalo de in-

tensidades superiores a 200 veh/h se reproduce correctamente mediante un modelo de regresión múltiple polinomial de orden 2. Cumple las hipótesis de homocedasticidad, linealidad, normalidad e independencia. En estos modelos no se presentan indicios de heterocedasticidad.

Se puede concluir, atendiendo al principio estadístico de la navaja de Occam y al principio de parquedad, que el mejor modelo que explica la relación intensidad-velocidad para vehículos ligeros y sin influencia de vehículos pesados, es decir en condiciones ideales de circulación, para intensidades superiores a 200veh/h es un modelo de regresión múltiple polinomial de orden 2.

$$I > 200 \text{ veh/h} \quad v = B' i^2 + C' i + D' \quad (3)$$

Referencias

- I. BLANK, L. (1980): *Statistical Procedures for Engineering, Management and Science*. McGraw-Hill, New York.
- II. CROW, E. L. *et al.* (1960): *Statistics Manual*. Research Department U.S. Naval Ordnance Test Station. Dover Publications, Inc. New York.
- III. DRAKE, J.S., SCHOFER, J.L. y MAY, A.D. (1967): *A statistical analysis of speed-density hypotheses*. Highway Research Record 154, pp. 53-87.
- IV. FISHER, R.A. y YATES, F. (1953): *Statistical tables*. Fourth edition. Oliver and Boyd. Edinburg Tweeddale Court, London. England.
- V. NAVIDI, WILLIAM (2006): *Estadística para ingenieros*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, Mexico D.F., Mexico.
- VI. PEÑA, D. (2002): *Regresión y Diseño de Experimentos*. Alianza editorial, Madrid, España.
- VII. PÉREZ, C. (2002): *Estadística práctica con Statgraphics*. Pearson Educación, S.A., Madrid. España.
- VIII. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2010): *Chapter 15: Two-lane highways. Highway Capacity Manual 2010*. TRB, National Research Council (sin editar).
- IX. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000): *Highway Capacity Manual 2000*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., (edición vigente).
- X. WHITE, K.J. (1977): *The Durbin-Watson test for serial correlation with extreme sample sizes of many regressors*. Econometría Vol, 45, 1977, pp 1989-1996. ❖

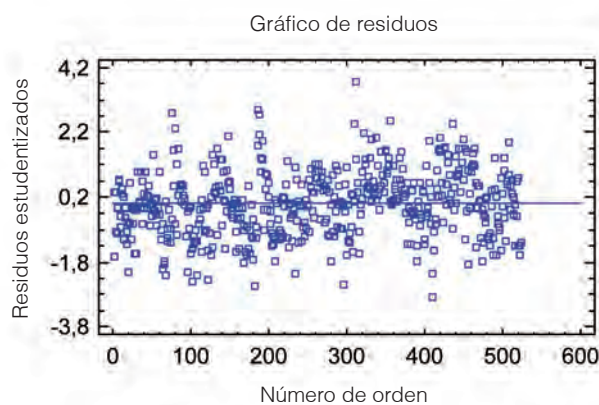


Figura 14. Hipótesis independencia. Gráfico de residuos frente a número de orden.