



# Velocidad deseada por los conductores en carreteras

El maestro Roberto Magallanes, investigador del IIUNAM, realizó el estudio de la velocidad deseada por los conductores en carreteras mexicanas, para proponer un nuevo enfoque de diseño geométrico. El diseño geométrico es la ordenación y dimensionamiento de los elementos visibles de la carretera para que ésta cumpla su función con eficiencia. Gracias al diseño geométrico, el paso del tránsito es eficiente, seguro, económico, rápido, cómodo y con el

menor impacto ambiental negativo posible. Para cumplir con su función, el diseño debe considerar las necesidades generadas por el tránsito, que se satisfacen casi por completo al determinar la sección transversal dada por el tipo de carretera que se seleccione. Para lograr la eficiencia deben considerarse fundamentalmente los alineamientos horizontal y vertical; los cuales se han diseñado tradicionalmente con la llamada velocidad de proyecto.

El concepto de velocidad de proyecto ha cambiado a través de los años, pues primero trataba de caracterizar la conveniencia (rapidez), luego la seguridad y actualmente, ya no intenta caracterizar ninguno de los atributos deseables, sino que se usa sólo como una referencia para diseñar los alineamientos, a través de un conjunto de modelos mecanicistas.

Un procedimiento alternativo de diseño es considerar como cifra de mérito la probabilidad de que la velocidad deseada por los conductores ( $V$ ) no sea mayor que la velocidad permitida por la carretera ( $v$ ), que bien pudiera ser la velocidad de proyecto, tal como se define actualmente. A esta cifra,  $P[V \leq v]$ , entre cero y uno, podría llamarse *índice de satisfacción* y representaría la fracción de conductores satisfechos por el diseño. Si se considera como falla al evento  $V > v$ , el índice de satisfacción es también una confiabilidad. Así pues, un primer paso para avanzar en este nuevo enfoque de diseño es caracterizar a la velocidad deseada por los conductores,  $V$ , como una variable aleatoria.

## 1. CARACTERIZACIÓN

La caracterización de la velocidad deseada como una variable aleatoria implica dos fases: determinación del tipo de modelo probabilista y determinación de los parámetros.

Para determinar el tipo de modelo, debe imaginarse cuál es el mecanismo con el cual los conductores seleccionan su velocidad. En la práctica, casi todos los autores consideran que la velocidad adoptada por los conductores, que en límite pudiera corresponder a la velocidad deseada, está distribuida según una función de Gauss o *normal*, lo que implica que resulta de un proceso aditivo. Este proceso pudiera asociarse con un *paradigma integrador* en el que el conductor selecciona su velocidad como un promedio pesado de un conjunto de restricciones de velocidades asociadas con habilidad, riesgo, vehículo, carretera, ambiente y valores tales como los que asigna a su vida, su tiempo y su respeto a la ley, entre otros. El modelo normal que resulta está caracterizado por una función de densidad abierta en ambos extremos, lo que pudiera implicar la adopción de velocidades negativas, lo que puede parecer absurdo.

Otro proceso posible es el asociado con un *paradigma discriminador* en el que el conductor selecciona su velocidad como el mínimo de las restricciones de velocidad antes mencionadas. En el límite, este paradigma conduce a un modelo de extremos tipo Weibull, el cual tiene un límite inferior que, al ser positivo, impide velocidades deseadas

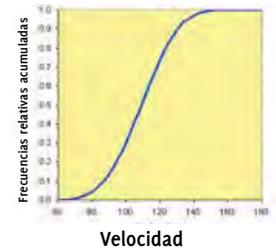
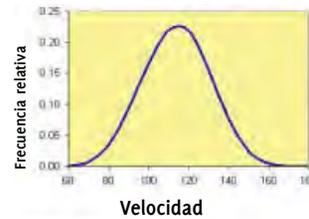
negativas, lo que presenta ventajas teóricas sobre el modelo normal. Por tanto, se optó por caracterizar a la velocidad deseada con un modelo tipo Weibull:

**Función de densidad:**

$$f_v(v) = -\frac{\kappa}{\omega - \varepsilon} \left(\frac{v - \varepsilon}{\omega - \varepsilon}\right)^{\kappa-1} \exp\left[-\left(\frac{v - \varepsilon}{\omega - \varepsilon}\right)^\kappa\right]$$

**Función de probabilidad:**

$$F_v(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v - \varepsilon}{\omega - \varepsilon}\right)^\kappa\right]$$



**Parámetros:**

$\kappa$  Factor de forma  
 $\omega$  Factor de escala  
 $\varepsilon$  Límite mínimo

La segunda parte de la caracterización consistió en determinar los parámetros del modelo, para lo que se recurrió a observar las velocidades en carreteras de muy diversos tipos, midiendo velocidades continuas o puntuales en dos de ellas:

### Carretera Cuernavaca-Acapulco (Cuota)

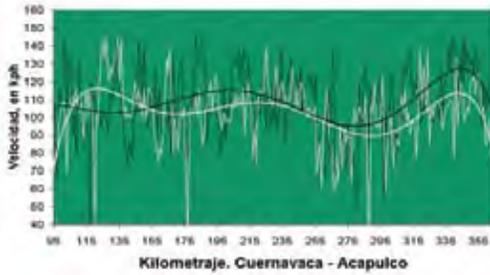
- Realizador: DGST - SCT
- Fecha: 2006-2007 (dos días)
- Cuatro mediciones continuas de velocidad de recorrido por km
- Diecinueve estaciones con 6,754 mediciones de velocidad puntual
- Configuración: Plano a Lomerio fuerte

### Carretera Guadalajara-Tepic (Libre)

- Realizador: Autor
- Fecha: 2007 (7 días)
- Una estación con 525 mediciones de velocidad de puntual
- Configuración: Lomerio

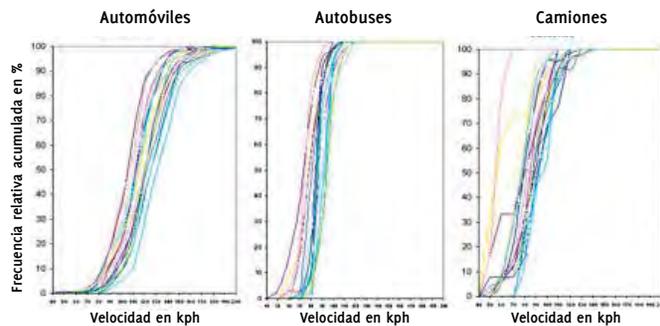
La medición de velocidades continuas se hizo a través de la técnica del *vehículo flotante*, que consiste en medir los tiempos de recorrido a cada determinada distancia, un kilómetro en este caso, de un vehículo de prueba que intenta representar las condiciones medias de la velocidad que adoptan los demás vehículos; para lo cual se hacen tantos rebases como se es rebasado. La representación gráfica de las velocidades

calculadas cada kilómetro a partir de los tiempos de recorridos de ida y vuelta registrados, es como se muestra:



La dispersión entre velocidades puede asociarse principalmente a los efectos de la composición y distribución del tránsito, pero la variación en las curvas de tendencia central puede asociarse con el efecto de la configuración topográfica de la carretera.

La representación de las mediciones puntuales de velocidad en sitios específicos, para cada tipo de vehículo, se ilustra en las siguientes gráficas:

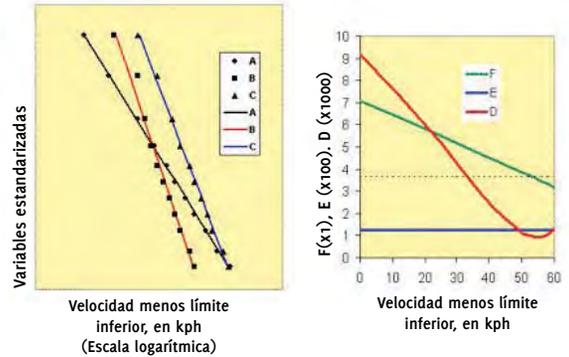


Al dibujar cada uno de los polígonos de frecuencia en papel de probabilidad tipo Weibull —donde la ordenada, en términos de la variable estandarizada, representa la frecuencia acumulada relativa restada de uno y la abscisa representa la velocidad menos el límite inferior supuesto— éstos tienen la apariencia mostrada a la izquierda de la siguiente figura, en la que el polígono de frecuencias relativo acumulado de la velocidad puntual es casi una línea recta. Ello indica que el modelo Weibull representa adecuadamente la realidad. Con una técnica de mínimos cuadrados, considerando desviaciones verticales, se determinaron las ecuaciones de regresión que mejor se ajustaban a las observaciones experimentales, haciendo variar la velocidad mínima y determinando en cada caso el parámetro de forma ( $F$  o  $\mathfrak{R}$ ), dado por la pendiente de la recta de regresión; el parámetro de escala ( $E$  o  $\omega$ ), dado por la ordenada al origen de regresión, y la desviación respecto a uno del coeficiente de correlación ( $D=1-\rho^2$ ). A la derecha de la siguiente figura se ilustra la

variación de estos parámetros al hacer variar la velocidad límite inferior para cada polígono de frecuencia.

En cada polígono de frecuencia se determinaron los parámetros que maximizan el coeficiente de correlación (o minimizaron su desviación a uno). Por ejemplo, para el polígono de frecuencias mostrado en la figura, para la desviación de 0.001 (coeficiente de correlación de 0.999) corresponde un factor de forma de casi 3.6, un factor de escala de 115 y un límite mínimo de velocidad de 55 k/h.

Polígonos de frecuencias acumuladas



## 2. CONCLUSIÓN

El análisis descrito se realizó para todos los polígonos de frecuencias relativas acumuladas observadas. Mediante agrupaciones, simplificaciones y comprobaciones con las observaciones de otras carreteras, se concluyó que la velocidad deseada en las carreteras mexicanas queda bien caracterizada con el modelo Weibull con factores de forma ( $\mathfrak{R}$ ), escala ( $\omega$ ) y límite mínimo ( $\epsilon$ ) que dependen del tipo de carretera (principales, secundarias o locales), tipo de vehículo (automóviles A, buses B o camiones C) y configuración orográfica (plano, lomerío o montañoso), de acuerdo con lo siguiente:

Factor de forma:	$\kappa = 3.6$	
Factor de escala:	$\omega = p.W$	
Límite mínimo:	$\epsilon = 0.5\omega$	
<b>Valores de W</b>	<b>Valores de P</b>	
Principales:	A 125 B 90 C 85	Plano: $p=1.00$
Secundarias:	110 90 80	Lomerío: $0.85 \leq p \leq 1.00$
Locales:	100 90 75	Montañoso: $0.70 \leq p \leq 1.00$

Con esta caracterización, es factible desarrollar un criterio de proyecto alternativo para el proyecto geométrico de carreteras en el que en vez de usar el tradicional concepto de velocidad de proyecto se utilice el índice de satisfacción de los conductores, con lo que se tendría un enfoque más racional que el empleado actualmente.