



Desarrollo de modelos de velocidad de operación de carreteras en terreno llano en Costa Rica

Development of speed profile prediction models in flat terrains in Costa Rica

Medina-García Liosber

Universidad Federal de Goiás, Brasil

Facultad de Ciencias y Tecnologías

Correo: lmedina@ufg.br

<https://orcid.org/0000-0002-4091-3491>

Delgado-Martínez Domingo E.

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingenierías y TIC's

Correo: domingo.delgado@ulatina.cr

<https://orcid.org/0000-0002-1689-3769>

Ulate-Zárate José M.

Universidad Latina de Costa Rica

Facultad de Ingenierías y TIC's

Correo: julatez@cfia.or.cr

<https://orcid.org/0000-0002-7361-1449>

García-Depestre René A.

Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas

Facultad de Construcciones, Cuba

Departamento de Ingeniería Civil

Correo: rengd@uclv.edu.cu

<https://orcid.org/0000-0003-1957-4760>

Resumen

Uno de los métodos más utilizados en las últimas décadas para evaluar la influencia del trazado en la seguridad vial son los estudios de consistencia del trazado. Al evaluar la consistencia del trazado es necesario contar con los perfiles de velocidad de operación del nuevo proyecto o de la carretera existente. Generalmente, al realizar los estudios se emplean modelos de velocidad de operación existentes, los cuales han sido desarrollados para otras condiciones, regiones o países. Sin embargo, los modelos de estimación de velocidad deben ser desarrollados o calibrados considerando las condiciones locales y, además, deben estar sujetos a revisiones a lo largo del tiempo. Por tanto, las ecuaciones obtenidas para una condición no deben ser extrapoladas sin análisis previos, por lo que las condiciones locales deben analizarse de manera particular. El objetivo del trabajo es desarrollar modelos de predicción de velocidad de operación propios que consideren las características del trazado geométrico de las carreteras en terreno llano y las condiciones del parque vehicular del país. El procedimiento metodológico propuesto para determinar los modelos de velocidad de operación consta de las siguientes etapas: Análisis de las carreteras del territorio y definición de parámetros fijos a investigar, determinación de los sitios y selección de la muestra, mediciones de velocidad en los sitios seleccionados, desarrollo de los modelos de predicción del perfil de velocidad y la validación de los modelos de desarrollados. Con los resultados de la investigación se logra por primera vez en Costa Rica desarrollar modelos de predicción de las velocidades de operación de las rutas nacionales con características rurales en terreno llano. Además, se demuestra que las ecuaciones propuestas presentan menores errores de estimación, si se comparan con algunos de los modelos más usados en el ámbito internacional.

Descriptores: Modelo de predicción, velocidad de operación, consistencia del trazado, seguridad vial, carreteras rurales.

Abstract

During the last few years, one of the most commonly used methods for evaluating the influence of the geometric design of roads on road safety is the analysis of road design consistency. When evaluating geometric design consistency, it is necessary to know beforehand the operating speed profiles of the road to be analyzed. A common practice is to use existing models of operating speed profiles, which are generally designed for the specific conditions of a particular region or country. However, models for estimating operating speed should be calibrated or developed considering local conditions, and they should also be revised systematically over time. Thus, equations obtained for a given condition should be analyzed taking into consideration local and regional characteristics. The aim of this paper is to develop models for predicting operating speed in Costa Rica by considering the characteristics of geometric design of rural national roads in flat terrains, as well as the features of the existing vehicles in the country. The proposed methodology to develop operating speed models consists of a series of stages: analysis of the roads in the region and definition of fixed parameters to be studied, selection of sites and sampling, speed measurement in selected locations, development of operating speed prediction models, and validation of the proposed models. The results of this study allow for the development of different models for rural national routes in flat terrain for the first time in Costa Rica. The study demonstrates that the proposed equations provide for lower estimations errors, when compared to international models used in other studies.

Keywords: Prediction model, operating speed, geometric design consistency, road safety, rural roads.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha recurrido a evaluar la seguridad vial a partir del análisis de la consistencia del trazado (Almeida *et al.*, 2018; Echaveguren, 2012; Fitzpatrick *et al.*, 2000; García *et al.*, 2012; Luque & Castro, 2016; Malaghan *et al.*, 2020; Vargas & Vanegas, 2016). El análisis de la consistencia del trazado permite verificar si las condiciones geométricas de la carretera generan pequeños diferenciales de velocidad entre elementos consecutivos, ya sea curvas y rectas en horizontal o acuerdos, tanto cóncavos como convexos. La consistencia del trazado se define como la relación entre las características geométricas del trazado de la carretera y las expectativas del conductor (Leisch & Leisch, 1977). Si hay correspondencia entre estos dos aspectos, la conducción del vehículo puede hacerse de modo continuo, sin sobresaltos, lo que incide favorablemente sobre la seguridad en la circulación. Aunque existen diferentes métodos para estimar la consistencia, los más utilizados son aquellos basados en el análisis de la velocidad de operación de los vehículos. Entre las principales ventajas de utilizar este tipo de análisis se destaca la posibilidad de su aplicación tanto a proyectos nuevos como existentes.

En los análisis de consistencia del trazado, es imprescindible contar con la información de la planta y perfil del proyecto y su velocidad de operación. Una de las principales dificultades y fuentes de error en estos análisis radica en la estimación de la velocidad de operación. Investigadores como Echaveguren *et al.* (2020), García & Alverca (2019), Llopis *et al.* (2018a) y Sil *et al.* (2019) coinciden en que la velocidad de operación se define como el percentil 85 de la distribución de velocidades a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de flujo libre. El percentil 85 es el más empleado debido a que representa aproximadamente la velocidad a la que operan los conductores y que se considera segura.

El primer modelo de velocidad de operación reconocido en la literatura fue desarrollado por Tagarin (1954) y uno de los más reconocidos es el de Fitzpatrick *et al.* (2000), entre otros. La mayoría de las metodologías de evaluación de la consistencia del trazado han desarrollado perfiles de velocidad o ecuaciones de pronóstico de este parámetro (Castro *et al.*, 2012; Fitzpatrick *et al.*, 2000; Llopis *et al.* (2018b); Praticò & Giunta, 2012). Los modelos de previsión de velocidad deben ser desarrollados o calibrados considerando las condiciones locales y, además, deben estar sujetos a revisiones a lo largo del tiempo.

Aunque en Centroamérica se cuenta con trabajos como el de Felipe (2014) donde se realizan estudios de velocidad de operación, en Costa Rica no se han realizado estudios de perfiles de velocidad. En aras de imple-

mentar los estudios de consistencia del trazado en la evaluación de la seguridad vial en Costa Rica es necesario desarrollar modelos propios de estos perfiles, que consideren las características del trazado y las condiciones del parque vehicular del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de la experiencia de varios investigadores, entre los que se destacan Castro *et al.* (2012), Esposito *et al.* (2011), Fitzpatrick *et al.* (2000) y Luque & Castro (2016) y tomando como base fundamental experiencias propias de García *et al.* (2012), se discuten algunos de los elementos más importantes para establecer un procedimiento metodológico para el desarrollo de perfiles de velocidad propios.

Para este fin, se debe disponer de informaciones y datos de los proyectos o carreteras ya existentes de la región objeto de estudio. Entre los parámetros más importantes se destacan la clasificación y el tipo de vía, el número de carriles, el tipo de terreno en que se encuentran, así como las características geométricas y la velocidad de operación. Los modelos de perfiles de velocidad se determinan en función de las múltiples combinaciones de trazado en planta y perfil, dependiendo de la categoría de la vía, tipo de terreno y criterios de diseño que establece el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras (SIECA, 2011).

En este sentido, para darle cumplimiento al objetivo de la investigación, se propone un procedimiento metodológico para determinar los modelos de velocidad de operación que consta de las siguientes etapas: Análisis de las carreteras del territorio y definición de parámetros fijos a investigar, determinación de los sitios y selección de la muestra, mediciones de velocidad en los sitios seleccionados, desarrollo de los modelos de predicción del perfil de velocidad y la validación de los modelos de desarrollados. A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

ANÁLISIS DE LAS CARRETERAS DEL TERRITORIO Y DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FIJOS A INVESTIGAR

En primer lugar, para desarrollar los perfiles de velocidad, es preciso contar con una caracterización de la red vial nacional del país o región que se desea evaluar y considerar los parámetros geométricos fijos y sus combinaciones. Una vez que se cuenta con datos de la red vial se debe establecer el tipo de carretera para el cual se van a desarrollar los modelos.

En Costa Rica la red nacional se clasifica en dos grupos: Red Vial Nacional, administrada por el Ministerio

de Obras Públicas y Transporte (MOPT) y Red Vial Cantonal, administrada por las municipalidades correspondientes. La Red Vial Nacional cuenta con 5127 km asfaltados y 2594 km en lastre, para un total de 7721 km. La Red Vial Cantonal se compone de 5073 km asfaltados, 29917 km en lastre y 5194 km no clasificados, para un total de 40184 km (Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2018). Esto representa una densidad de carreteras de aproximadamente 0.79 km/km².

En cuanto a parámetros geométricos fijos y sus combinaciones, que son elementos que no varían a lo largo de la vida útil de la carretera, siempre que no se realicen intervenciones, los más significativos para el desarrollo de modelos respecto a las características geométricas son la pendiente y el radio de curvatura horizontal, grado de curvatura, longitud de curva y Kv.

DETERMINACIÓN DE LOS SITIOS Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Se denomina sitio a la agrupación de una o varias curvas de características geométricas similares de la misma condición, ya sea curva horizontal, vertical o su combinación. Para organizar el procedimiento de selección del sitio se recomienda que las alineaciones horizontal y vertical se dividan en grupos o que incluyan las combinaciones deseadas (Fitzpatrick *et al.*, 2000). Los estudios anteriores de García *et al.* (2012) y Fitzpatrick *et al.* (2000) recomiendan que, para desarrollar perfiles de velocidad de operación, se han de agrupar los elementos de características geométricas similares.

Cada uno de los tramos de la red vial se clasifica según las pendientes de la rasante y el terreno; de esta manera, se define a qué tipo de terreno pertenecen los sitios clasificados en cada condición o caso, ya sea llano, ondulado o montañoso. Esta clasificación para el caso de Costa Rica se realiza según el manual de SIECA (2011).

En el estudio de Fitzpatrick *et al.* (2000), se determinan diez combinaciones de sitios y, para cada uno de ellos se establecieron los modelos de predicción de velocidad. En el caso del estudio realizado por García *et al.* (2012), se definieron ocho tipos de sitios, lo que demuestra que estas combinaciones pueden variar en función de las condiciones locales, regionales o del país donde se desarrolle este tipo de estudio.

Una vez definida la localidad, región o país y tipo de terreno para el cual se va a establecer el perfil de velocidad, se define la población con que se cuenta para el estudio y, a partir de ella, se determina una muestra representativa. El cálculo del número de muestras se realiza utilizando la Ecuación 1, que es recomendable utilizar cuando se conoce el tamaño de la población:

$$n = \frac{Z^2 pqN}{NE^2 + Z^2 pq} \quad (1)$$

Donde:

- n = tamaño de la muestra
- Z = nivel de confianza
- p = variabilidad positiva
- q = variabilidad negativa
- N = tamaño de la población
- E = precisión o error

MEDICIONES DE VELOCIDAD EN LOS SITIOS SELECCIONADOS

La velocidad de operación se determina para vehículos ligeros en horario diurno, en condiciones climáticas favorables y con pavimento seco y en buen estado de conservación. Los estudios de velocidad deben realizarse en el punto de la curva donde se propicia un aumento de la velocidad de operación (Fitzpatrick *et al.*, 2000) y se pueden utilizar diferentes técnicas, entre las que se destaca la utilización de la pistola láser. Estudios realizados por Abbas *et al.* (2011), Fitzpatrick *et al.* (2000) y García *et al.* (2012) refieren que, para las condiciones que involucran rectas en curvas verticales, ya sean cóncavas o convexas, las velocidades deben ser medidas en el punto medio, exactamente donde se forma la curva vertical. Los investigadores García & Alverca (2019) y Wilches *et al.* (2020) refieren que el punto más apropiado para la medición de la velocidad operacional en curvas horizontales es el punto medio.

En el caso de combinación de curvas horizontales con curvas verticales, las velocidades se deben medir en el punto medio de la curva horizontal, que también debe coincidir, desde la concepción del proyecto con el punto donde se da el cambio de pendiente que genera el acuerdo (García *et al.*, 2012). Con el objetivo de verificar tales afirmaciones se decidió realizar mediciones de la velocidad en tres puntos de las curvas horizontales: Punto de inicio (PC), Punto medio (PM) y Punto de final (PT). Esta idea se justifica en que autores como Maji & Tyagi (2018) determinaron que variaciones de las velocidades en varios puntos dependen de combinaciones de longitud de curva, curvatura y velocidad en el segmento anterior de la carretera. Otros como Dai *et al.* (2017) demostraron la influencia de diferentes parámetros, como el radio de la curva horizontal y la pendiente de la curva vertical sobre la velocidad.

Una de las expresiones estadísticas que puede ser utilizada para establecer el tamaño de la muestra de mediciones de velocidad es la Ecuación 2, recomendada por Robertson *et al.* (1994):

$$n = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2} \tag{2}$$

Donde:

- S = Desviación estándar estimada (km/h)
- K = Constante asociada al nivel de confianza deseado
- U = Constante asociada al percentil analizado
- E = Error permitido (km/h)
- n = Tamaño de la muestra (número mínimo de mediciones de velocidad)

Los valores de la desviación estándar estimada S pueden ser obtenidos según recomendaciones de Robertson *et al.* (1994). La Tabla 1 presenta los valores que se sugieren para estos casos.

Tabla 1. Desviación estándar para determinar el tamaño de muestra

Área de tráfico	Tipo de vía	Desviación estándar (km/h)
Rural	Un carril	8.5
	Dos carriles	6.8
Intermedia	Un carril	8.5
	Dos carriles	8.5
Urbana	Un carril	7.7
	Dos carriles	7.9
Valor recomendado		8.0

De igual forma, para obtener los valores de la constante K, los autores Robertson *et al.* (1994) recomiendan utilizar los valores de la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de constante K

Nivel de confianza (%)	Constante K	Nivel de confianza (%)	Constante K
68.30	1.00	95.50	2.00
86.60	1.50	98.80	2.50
90.00	1.64	99.00	2.58
95.00	1.96	99.70	3.00

Los investigadores Robertson *et al.* (1994) establecen los valores de la desviación estándar estimada S en función del percentil de velocidad, según la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de constante U

Percentil de velocidad	Constante U
50.00	0.00
85.00	1.04
93.00	1.48
95.00	1.64

En caso de que los proyectos, bases de datos, etcétera, que estén a disposición de los investigadores no sean suficientes para garantizar la representatividad del muestreo, se recomienda recopilar información complementaria con trabajos de campo, siempre y cuando existan sitios para ampliar la muestra. Estos estudios complementarios *in situ* facilitan la verificación o determinación de información para satisfacer el tamaño de muestra requerido para el trabajo.

DESARROLLO DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD

Inicialmente se definen los estadígrafos descriptivos de las variables analizadas, entre ellos, varianza, desviación estándar, media, etcétera, con el fin de aplicar un criterio de limpieza de datos o errores que permita rechazar valores anómalos y, de esta forma, disminuir la dispersión de los datos. Algunos de estos criterios pueden ser el criterio de rechazo 2σ , gráficos de dispersión, etcétera. Después debe probarse la normalidad de las variables.

Generalmente, el primer paso para establecer ecuaciones de regresión es determinar el coeficiente de correlación entre las variables y gráficos de dispersión de las variables correlacionadas. Entonces se establecen las variables con mayor fuerza de asociación para establecer modelos de regresión univariados o multivariados. El modelo puede poseer un ajuste lineal o de cualquier otro tipo, que será determinado por el investigador. En los análisis de regresión se deben comprobar, que se cumplan los supuestos básicos de la regresión y la robustez de la asociación de las variables. Un aspecto importante es que, a partir del análisis bibliográfico se pueden establecer las variables que generalmente presentan mejor fuerza de asociación y los modelos que mejor se ajustan a la variable de respuesta.

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE DESARROLLADOS

Con este objetivo pueden aplicarse dos alternativas. La primera alternativa es la selección de forma aleatoria de uno o más sitios que pertenezcan a la población objeto de estudio y que no formen parte de la muestra empleada para generar el modelo. En este caso, se debe proceder a medir *in situ* las velocidades de operación y comparar las velocidades reales de operación con las velocidades estimadas por el modelo. Si los diferenciales de las velocidades son inferiores al error de la estimación se valida el modelo. La segunda alternativa consiste en la verificación de la exactitud de las predicciones de velocidad de los modelos propuestos al comparar las mediciones realizadas *in situ* con otros

modelos desarrollados para las mismas condiciones de sitio definidas en este estudio.

Al aplicar la segunda alternativa en Costa Rica u otro país en el que existan diferencias entre normativas,

se debe hacer una comprobación como la que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Modelos utilizados en la comprobación

Caso	Combinaciones de estudios internacionales	Combinaciones en Costa Rica para terreno llano	(Fitzpatrick <i>et al.</i> , 2000)	(García <i>et al.</i> , 2012)
1	Curva horizontal en pendiente (-9 % a -4 %)	-	$V_{op} = 102.10 - \frac{3077.13}{R}$	$V_{op} = 76.587 - \frac{1305.731}{R}$
2	Curva horizontal en pendiente (-4 % a 0 %)	Curva horizontal sobre pendiente (-5 % < i < 0 %)	$V_{op} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	$V_{op} = 77.44 - \frac{1206.266}{R}$
3	Curva horizontal en rampa (0 % a 4 %)	Curva horizontal sobre pendiente (0 % < i < 5 %)	$V_{op} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$	$V_{op} = 77.212 - \frac{1435.599}{R}$
4	Curva horizontal en pendiente (4 % a 9 %)	-	$V_{op} = 96.61 - \frac{2752.19}{R}$	$V_{op} = 79.977 - \frac{2410.793}{R}$
5	Curva horizontal combinada con curvas cóncavas	Curva horizontal combinada con acuerdo cóncavo	$V_{op} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$	$V_{op} = 83.599 - \frac{2247.827}{R}$
6	Curva horizontal combinada con curvas convexas sin limitación de visibilidad	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo sin limitación de visibilidad	Ver Nota 1	$V_{op} = 79.883 - \frac{1744.898}{R}$
7	Curva horizontal combinada con curva convexa y limitación en la distancia de visibilidad (k ≤ 43 m/%)	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo y limitación en la distancia de visibilidad (k ≤ 43 m/%)	$V_{op} = 105.32 - \frac{3438.19}{R}$ Ver Nota 2	$V_{op} = 79.883 - \frac{1744.898}{R}$
8	Curva vertical cóncava sobre recta horizontal	Acuerdo cóncavo en recta	Se asume la V_{85} como velocidad deseada	$V_{op} = 84.0108 - \frac{0.177}{Kv}$
9	Curva vertical Convexa en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad (k > 43 m/%)	Acuerdo Convexo en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad (k > 43 m/%)	Se asume la V_{85} como velocidad deseada	$V_{op} = 105.08 - \frac{149.69}{Kv}$
10	Curva vertical Convexa en recta, con limitación en la distancia de visibilidad (k ≤ 43 m/%)	Acuerdo Convexo en recta, con limitación en la distancia de visibilidad (k ≤ 43 m/%)	$V_{op} = 105.08 - \frac{149.69}{Kv}$	$V_{op} = 83.332 - \frac{0.157}{Kv}$

Nota 1: Usar la menor velocidad estimada con las ecuaciones 1 o 2 (para pendientes descendentes) y 3 o 4 (para pendientes ascendentes)

Nota 2: Comparar la velocidad estimada con las ecuaciones 1 o 2 (para pendientes descendentes) y 3 o 4 (para pendientes ascendentes) y usar la menor. Esto asegurará que la velocidad estimada a lo largo de las curvas combinadas no será mejor que si solo la curva horizontal está presente (es decir, la inclusión de una curva convexa con visibilidad limitada resulta en una mayor velocidad)

En este caso, las ecuaciones 1 y 4 no pueden aplicarse para el caso de terreno llano y las ecuaciones 2 y 3 difieren en los valores de pendientes de rasante. Por tanto, de las ecuaciones propuestas por Fitzpatrick *et al.* (2000) y García *et al.* (2012), solo podrían ser objeto de comparación los casos 2, 3 y del 5 al 10, que son las combinaciones apropiadas a casos de terreno llano.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al analizar la importancia de las carreteras rurales y su representatividad a nivel nacional, se decide desarrollar los perfiles de velocidad para carreteras clasificadas como rurales de dos carriles de circulación, en terreno llano y declaradas rutas nacionales. Estas vías mueven los mayores volúmenes de tránsito a nivel nacional y en ellas ocurren buena parte de los accidentes de tránsito que se desean evaluar a partir de estudios de consistencia del trazado. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología empleada.

ANÁLISIS DE LAS CARRETERAS DEL TERRITORIO Y DEFINICIÓN DE PARÁMETROS FIJOS A INVESTIGAR

La base de datos empleada se generó a partir del análisis de los proyectos de carreteras disponibles en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Latina de Costa Rica, y de otros obtenidos mediante la colaboración con diferentes compañías privadas y dependencias gubernamentales. La Tabla 5 muestra los tramos de carretera de dos carriles en terreno llano utilizados para el estudio. De todos los tramos de los cuales se dispone de su diseño geométrico, solo los incluidos en la tabla cumplen con los requisitos de parámetros fijos y buen estado de conservación vial.

Tabla 5. Trazados obtenidos para el desarrollo de la metodología

Nombre del trazado	Kilómetros
Barranca-Limal	52.00
Limal-Cañas	10.00
Paquera-Tambor	20.24
Orotina-Caldera	76.64
Tucurrique	2.80
Total	161.68

DETERMINACIÓN DE LOS SITIOS Y SELECCIÓN DE LA MUESTRA

A partir de la población disponible de sitios en terreno llano de carreteras rurales de interés nacional de Costa Rica, en este caso 161.68 km distribuidos en las diferen-

tes regiones y provincias del país, aunado a que su selección es casuística “por disponibilidad”, se considera un criterio que favorece su representatividad. De esta población, se obtienen combinaciones de trazado agrupadas en condiciones similares a las del trabajo desarrollado por Fitzpatrick *et al.* (2000). Es importante señalar que las condiciones geométricas de los modelos internacionales no coinciden exactamente con las condiciones normadas por el manual del SIECA (2011), que considera la pendiente máxima hasta 5 % para rasantes en terreno llano. La Tabla 6 presenta la agrupación de sitios que logran ser identificados en la población de tramos de carreteras.

Tabla 6. Muestras de sitios por casos de estudio

Caso	Combinación de trazado	Población	Muestra
2	Curva horizontal sobre pendiente (-5 % < i < 0 %)	34	25
3	Curva horizontal sobre pendiente (0 % < i < 5 %)	34	25
5	Curva horizontal combinada con acuerdo cóncavo	26	20
6	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo sin limitación de visibilidad	11	10
7	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo y limitación en la distancia de visibilidad (k ≤ 43 m/%)	19	16
8	Acuerdo cóncavo en recta	30	23
9	Acuerdo convexo en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad (k > 43 m/%)	20	16
10	Acuerdo convexo en recta, limitación en la distancia de visibilidad (k ≤ 43 m/%)	22	18

MEDICIONES DE VELOCIDAD EN LOS SITIOS SELECCIONADOS

La toma de muestras de velocidad en el terreno se realiza con mediciones directas a vehículos en movimiento y bajo las condiciones mencionadas en la sección 2. Este proceso se realiza con una pistola láser de marca Stalker y precisión de ± 2.5 km/h.

El cálculo del tamaño de la muestra de velocidad se realizó considerando valores de S=8.5 km/h, nivel de confianza de 95 % (K=1.96), un valor de U=1.04 correspondiente al percentil 85 y error E=6.5 km/h. Además, se consideran los valores de p y q iguales a 0.5. El intervalo de error recomendado por Robertson *et al.* (1994)

es de 1.61 km/h hasta 8.05 km/h. En este sentido, otra consideración importante es que la precisión de la pistola láser no debe ser superior al error elegido, con lo que se evita falsear los resultados estadísticos. Con estos datos se obtuvo un tamaño de muestra igual a 10.

Aunque en ninguno de los casos de estudio, el tamaño de la muestra es menor que 10, se procede a calcular, mediante la Ecuación 2, la desviación estándar y el error, donde se utilizan los mismos valores de $K=1.96$ y $U=1.04$, pero los valores de N se sustituyen con la muestra de cada caso y S se sustituye con los valores de desviación estándar obtenidos de las mediciones en campo. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos. Aunque en algunos casos se sobrepasa el valor de desviación estándar y el error asumido de 6.5 km/h, en ninguno se supera el error máximo establecido por Robertson *et al.* (1994) de 8.05 km/h (5 mill/h); por lo tanto, se aceptan los tamaños de muestras determinados.

Tabla 7. Valores de desviación estándar y error para el número real de muestras

Caso	U	K	N	S(Km/h)	E(Km/h)
2	1.04	1.96	25	9.16	4.46
3	1.04	1.96	25	12.06	5.87
5	1.04	1.96	20	9.21	5.01
6	1.04	1.96	10	3.43	2.64
7	1.04	1.96	16	7.61	4.63
8	1.04	1.96	23	15.83	8.03
9	1.04	1.96	16	8.52	5.18
10	1.04	1.96	18	12.16	6.97

Al realizar la comparación de las velocidades aplicando la prueba t para muestras relacionadas, se determina que no existen diferencias significativas entre los valores de velocidad medidos entre el PC y el PT; sin embargo, estas diferencias de velocidad sí son significativas al comparar el PC con el PM y el PM con el PT. Por tanto, los resultados obtenidos sustentan la necesidad de tomar muestras de velocidad en el PM, la cual se asocia con la velocidad de operación de la carretera. Existe la tendencia de los conductores a disminuir la velocidad en el primer tercio del desarrollo de la curva horizontal y recuperar esta velocidad a partir del segundo tercio (Tabla 8).

DESARROLLO DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN DEL PERFIL DE VELOCIDAD

Los modelos de predicción del perfil de velocidad de operación se obtienen con la aplicación de técnicas de regresión y se desarrollan a partir de las variables que muestran mayor fuerza de asociación, no necesariamente a partir de las mismas variables encontradas en otros modelos de la literatura. El procesamiento estadístico se realiza con el programa estadístico Minitab, versión 14.12.0. En la Tabla 9 se muestran las ecuaciones de predicción de velocidad para los casos seleccionados que satisfacen los análisis estadísticos.

El criterio estadístico para la selección de los modelos más apropiados se basó en el análisis conjunto del coeficiente de correlación de Pearson (R), el coeficiente de determinación (R²), el nivel de significación de la

Tabla 8. Prueba t para muestras relacionadas de las velocidades medidas en PC, PM y PT

Punto de medición	Diferencias emparejadas					t	ggl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95 % de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
PC-PM	-10.00	4.26	1.90	-15.29	-4.71	-5.25	4	0.006
PM-PT	9.54	1.67	0.75	7.47	11.61	12.80	4	0.000
PC-PT	-0.46	5.30	2.37	-7.04	6.12	0.194	4	0.856

Fuente: Minitab

Tabla 9. Modelos de perfil de velocidad para cada caso

Caso	Ecuación
2	$V_{85} = 54.064 + 0.029 Lc - 0.183 * GC$
3	$V_{85} = 39.056 + 0.047 Lc + 0.009 R * 2.791 G$
5	$V_{85} = 43.639 + 0.011 * R 0.029 Lc$
6	$V^{\lambda} - 1 / \lambda * g^{\lambda - 1} = 6.31 + 0.843 R - 0.08079 Lc, \lambda = 5; g = 52.06$
7	$V_{85} = 44.377 + 0.13 R$
9	$V_{85} = 70.238 - 3.260 G + 989.523 K^{-1}$

Lc = Longitud de la curva, GC = Grado de curvatura, R = Radio de la curva, λ = Coeficiente de la ecuación de regresión, g = Media geométrica de V, Kv = tasa de la curva vertical

ecuación de regresión (p), el error estándar en la estimación del modelo (S) y el estadístico Durbin-Watson (d). El resumen de estos criterios se presenta en la Tabla 10. De igual forma, se revisó el cumplimiento de los criterios básicos de las regresiones propuestas y la robustez de la asociación de las variables implicadas.

Tabla 10. Resumen de pruebas estadísticas para los modelos de cada caso

Caso	R	R ²	p	S(km/h)	d
2	0.757	0.573	0.000	9.16	1.363
3	0.733	0.537	0.000	12.06	1.560
5	0.793	0.629	0.000	9.21	0.987
6	0.9875	0.9840	0.000	3.43	1.424
7	0.722	0.521	0.002	7.61	1.990
8	0.345	0.119	0.106	15.83	0.987
9	0.717	0.514	0.009	8.52	1.205
10	0.363	0.132	0.346	12.16	1.408

R = Coeficiente de Pearson, R² = Coeficiente al cuadrado, p = significancia, S = Error estándar en la estimación, d = Durbin Wanston

A partir del análisis estadístico, se establece que las ecuaciones de regresión 8 y 10 no satisfacen la generali-

dad de los estándares de evaluación relacionadas con este tipo de ecuación de pronóstico, por lo que fueron excluidas de la propuesta presentada en la Tabla 9. Sin embargo, el resto de los modelos de predicción establecidos se consideran apropiados a partir del análisis de conjunto de las técnicas antes citadas.

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE DESARROLLADOS

A continuación, en la Tabla 11, se muestran las velocidades estimadas por los modelos propuestos y su comprobación por las alternativas 1: Comparación con velocidades reales medidas in situ, y alternativa 2: Comparación con otros modelos para casos similares.

Al realizar la comprobación con los modelos propuestos, se determina que presentan un excelente ajuste con las velocidades de operación reales medidas *in situ*; sin embargo, al compararlo con otros modelos desarrollados para condiciones de otros países, como los trabajos de Fitzpatrick *et al.* (2000) y García *et al.* (2012) para condiciones similares, se evidencian diferencias importantes, por lo que no son apropiados para el caso de Costa Rica.

La validación de los modelos de predicción propuestos, en la Tabla 11, confirma la necesidad de desarrollar modelos propios de velocidad de operación que

Tabla 11. Validación de los modelos para caso de trazado 8

Caso	Velocidad estimada (km/h)	Velocidad medida (km/h)	Diferencia absoluta (km/h)
2F	90.52		27.88
2G	72.41	62.64	9.77
2	56.72		5.92
3F	57.16		18.41
3G	58.07	38.75	19.32
3	40.44		1.69
5F	59.48		11.86
5G	53.63	47.62	6.01
5	45.59		2.03
6F	99.38		55.96
6G	77.23	43.42	33.81
6	41.99		1.43
7F	82.40		15.45
7G	68.25	66.95	1.30
7	63.88		3.07
9F	81.25		0.00
9G	101.60	81.25	20.35
9	86.40		5.15

Caso 8 = Modelo desarrollado en este trabajo de investigación, Caso 8 (F) = Modelo desarrollado por Fitzpatrick *et al.* (2000), Caso 8 (G) = Modelo desarrollado por García *et al.* (2012)

consideren las peculiaridades del trazado geométrico del país o región y su parque vehicular, si se desea realizar la evaluación de la seguridad vial a partir de los análisis de consistencia del trazado.

Los modelos de predicción de perfiles de velocidad desarrollados para Costa Rica constituyen un primer momento de un proyecto encaminado a evaluar la seguridad vial de carreteras rurales de dos carriles de interés nacionales a partir del estudio de consistencia del trazado. El citado estudio permitiría proponer medidas correctivas que pueden incluir mejoras parciales de los trazados existentes, dada la necesidad de disminuir los altos índices de accidentalidad del país.

CONCLUSIONES

Por primera vez en Costa Rica, se establecen seis modelos de predicción de velocidad de operación para carreteras rurales nacionales en terreno llano, los cuales fueron validados *in situ* a través de mediciones de velocidad.

Se constata estadísticamente que las mediciones de velocidad *in situ* deben realizarse en el punto medio de la curva horizontal, ya que en este se presentan las velocidades máximas o mínimas, según el efecto de la pendiente del trazado.

Se emplea una propuesta metodológica propia para el desarrollo de los modelos de velocidad de operación. Esta propuesta puede ser aplicable a otras condiciones de trazado, así como a países en vías de desarrollo.

Se demuestra la necesidad de desarrollar modelos propios de predicción de velocidad de operación al comparar estos modelos con sus equivalentes disponibles en la literatura internacional.

Los modelos desarrollados para el caso de carreteras nacionales de características rurales en terreno llano permiten desarrollar perfiles de velocidad y la evaluación de consistencia del trazado para proyectos nuevos o existentes en Costa Rica, u otros países o regiones con características similares.

REFERENCIAS

- Abbas, S. K. S., Adnan, M. A., & Endut, I. R. (2011). Exploration of 85th percentile operating speed model on horizontal curve: A case study for two-lane rural highways. *Procedia. Social and Behavioral Sciences*, 16, 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.456>
- Almeida, R., Vasconcelos, L., & Bastos-Silva, A. (2018). Design consistency index for two-lane roads based on continuous speed profiles. *PROMET-Traffic&Transportation*, 30(2), 231-239. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i2.2573>
- Castro, M., Sanchez, J. A., & Sanchez, J. F. (2012). Operating speed models for two-lane rural highways. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 165(TR2), 107-118. <https://doi.org/10.1680/tran.2012.165.2.107>
- Dai, Y., Lyu, N., & Hu, Y. (2017). Truck speed characteristics analysis of typical highway segments based on GPS data. 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Recuperado de <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047817>
- Echaveguren, T. (2012). Análisis de consistencia de caminos bidireccionales usando mediciones continuas de velocidad de operación obtenidas con GPS. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(2), 55-70. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000200004>
- Echaveguren, T., Henríquez, C., & Jiménez-Ramos, G. (2020). Longitudinal acceleration models for horizontal reverse curves of two-lane rural roads. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(1), 103-125. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.463>
- Esposito, T., Mauro, R., Russo, F., & Dell, G. (2011). Speed prediction models for sustainable road safety management. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20, 568-576. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.063>
- Felipe, E. A. (2014). *Análisis de consistencia del trazado en caminos de montaña, en la república de Guatemala*. (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5047/>
- Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., Tsimhoni, O., Collins, J. M., Green, P., Bauer, K. M., Parma, K. D., Koppa, R., Harwood, D. W., Anderson, I., Krammes, R. A., & Poggioli, B. (2000). Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways. Recuperado de <https://trid.trb.org/view/691718>
- García, Y., & Damián, F. (2019). Calibración de ecuaciones de velocidades de operación en carreteras rurales montañosas de dos carriles: Caso de estudio ecuatoriano. *Revista Politécnica*, 43(2), 37-44. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.1012>
- García, R. A., Delgado, D. E., & Díaz, E. E. (2012). Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(2), 71-82. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000200005>
- Leisch, J. E., & Leisch, J. P. (1977). New concepts in design-speed application. *Transportation Research Record*, 631, 4-14. <https://trid.trb.org/view/71966>
- Llopis, D., Bella, F., Camacho, F. J., & García, A. (2018). New consistency model based on inertial operating speed profiles for road safety evaluation. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(4), 04018006. <https://doi.org/10.1061/jte-pbs.0000126>
- Llopis, D., González, B., Pérez, A. M., & García, A. (2018). Speed prediction models for trucks on horizontal curves of two-lane rural roads. *Transportation Research Record: Journal of the Trans-*

- portation Research Board*, 2672(17), 72-82. <https://doi.org/10.1177/0361198118776111>
- Luque, R., & Castro, M. (2016). Highway geometric design consistency: Speed models and local or global assessment. *International Journal of Civil Engineering*, 14(6), 347-355. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0025-2>
- Maji, A., & Tyagi, A. (2018). Speed prediction models for car and sports utility vehicle at locations along four-lane median divided horizontal curves. *Journal of Modern Transportation*, 26(4), 278-284. <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0162-1>
- Malaghan, V., Pawar, D. S., & Dia, H. (2020). Modeling operating speed using continuous speed profiles on two-lane rural highways in India. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(11), 04020124. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000447>
- Praticò, F. G., & Giunta, M. (2012). Modeling operating speed of two lane rural roads. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.916>
- Robertson, D. H., Hummer, J. E., & Nelson, D. C. (1994). Spot speed studies. In *Manual of Transportation Engineering Studies*. Institute of Transportation Engineers.
- SIECA, S. de I. E. C. (2011). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras*. 3a ed. Secretaría de Integración Económica Centroamericana. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2003.1246782>
- Sil, G., Maji, A., Nama, S., & Maurya, A. K. (2019). Operating speed prediction model as a tool for consistency based geometric design of four-lane divided highways. *Transport*, 34(4), 425-436. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.10715>
- Tagarin, A. (1954). Driver performance on horizontal curves. 33rd annual meeting of the high-way research board, 446-466. Recuperado de <https://trid.trb.org/view/116243>
- Vargas, R. P., & Vanegas, N. C. S. (2016). Definición del modelo de consistencia de velocidad para una carretera rural en el departamento de Santander a partir de un tramo experimental. XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 1-24. Recuperado de http://congresodevialidad.org.ar/congreso2016/tp_seguridad.html
- Wilches, F. J., Burbano, J. L. A., & Sierra, E. E. C. (2020). Vehicle operating speeds in southwestern Colombia: An important database for the future implementation of optimization models for geometric design of roads in mountain topography. *Data in Brief*, 32, 106210. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106210>

Cómo citar:

Medina-García, L., Delgado-Martínez, D. E., Ulate-Zárate, J. M., & García-Depestre, R. A. (2023). Desarrollo de modelos de velocidad de operación de carreteras en terreno llano en Costa Rica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24 (04), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.4.030>