

Análisis de consistencia geométrica, mediante la estimación de velocidades de operación, en curvas horizontales de los corredores: Bogotá - Choachí, Salitre-Sopó y Patios-Guasca

Geometric consistency analysis, through estimation of operating speeds, in horizontal curves of the corridors: Bogotá - Choachí, Salitre - Sopó and Patios - Guasca.

H.S. Rincón G.¹, R. V. Pinzon², D. A. Zuluaga³, W. E. Vargas⁴

¹Especialización en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas, Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. rinconsantiago25@yahoo.com

²Especialización en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas, Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. robertvasq15@hotmail.com

³Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. daniel.zuluaga@esing.edu.co

⁴Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá, Colombia. wvargas@udistrital.edu.co

Página

11

ESING

FECHA DE RECEPCIÓN:25/07/2020

FECHA DE ACEPTACIÓN:04/09/2020

RESUMEN

Actualmente, no se cuenta con modelos de predicción de velocidades de operación en tramos viales, que sean aplicables para el departamento de Cundinamarca, ni tampoco existe en el manual de diseño geométrico de vías 2008, una metodología clara de revisión de la consistencia geométrica de un tramo vial. Teniendo en cuenta lo anterior y producto de esta investigación, se generaron una serie de modelos de predicción de velocidades de operación en curvas horizontales, mediante el procesamiento del registro de la medición de velocidades reales en campo para las condiciones topográficas de los tramos de estudio.

Se estudiaron dos tramos de vía con terreno plano, ondulado y montañoso; los cuales conectan los municipios de Bogotá – Choachí y Patios – Guasca. Se generaron 6 modelos de predicción de velocidades de operación ajustados, los cuales se construyeron, aplicando variables técnicas como: vehículos livianos, velocidad de diseño, agrupación de pendientes y radio de curvatura. La única variable dependiente de la investigación fue la velocidad de operación. Una vez finalizada la construcción de los modelos, se realizó el análisis de consistencia geométrica, usando los criterios I y II establecidos por Lamm. Se encontró que la consistencia geométrica está asociada con el cumplimiento de la relación de radios y con la

homogeneidad de la velocidad específica.

PALABRAS CLAVE

Criterios de lamm, velocidad de operación, Consistencia geométrica, Modelos de predicción

ABSTRACT

Actually, there are no models for predicting operating speeds in road sections, which are applicable to Cundinamarca state, nor is there a clear methodology for reviewing the geometric consistency of a road section in the 2008 road design manual. Taking into account the above and as a result of this research, a series of prediction models of operating speeds in horizontal curves were generated, by processing the record of real field velocity measurements for the topographic conditions of the study sections.

Two sections of track with flat, undulating and mountainous terrain were studied; which connect the municipalities of Bogotá - Choachí and Patios - Guasca. Six prediction models of adjusted operating speeds were generated, which were constructed, applying technical variables such as: light vehicles, design speed, slope grouping and radius of curvature. The only dependent variable on the investigation was the operation speed. Once the model construction was completed, the

geometric consistency analysis was performed, using criteria I and II established by Lamm. It was found that geometric consistency is associated with compliance with the ratio of radii and with the specific velocity homogeneity.

KEYWORDS

Lamm criteria, Operation speed, Geometric Consistency, Prediction models.

INTRODUCCIÓN

Los trazados viales en Colombia se ven afectados por condiciones topográficas montañosas, las cuales generan diseños con restricciones de geometría y problemas de seguridad vial, que se ven reflejadas en las tasas de accidentalidad [3].

Con el fin de disminuir, las tasas de accidentalidad en Colombia, Ordoñez [4] realizaron modelos de predicción de velocidades de operación, validados solo para el departamento del Cauca, sin especificaciones técnicas para su uso, y con coeficientes de correlación por debajo de 0.70.

Así mismo el ingeniero Calán [5], abordó el tema de seguridad vial, realizando un análisis de consistencia geométrica, para los tramos Salitre-Sopo, Patios-Guasca, Bogotá-Ubaque, usando los modelos construidos por el colombiano Ordoñez [4]. De acuerdo con la revisión propia de los modelos propuestos por Ordoñez, se encontró que los modelos fueron realizados en vías con velocidades de diseño de entre 40 Km/h y 50 Km/h. De esta manera se puede notar la imprecisión de usar modelos sin conocer su especificación técnica, toda vez que los tramos de estudio evaluados por Calán, presentaban velocidades de diseño de entre 30 Km/h y 70 Km/h. Por lo tanto, el análisis de consistencia geométrica realizado no resulta ser preciso como para poder detectar tramos críticos, es así que la presente investigación pretende atenuar el problema de seguridad vial, con la generación de modelos ajustados que se puedan aplicar para vías de condiciones similares, usando como criterio estricto de aplicación, la velocidad de diseño, el ancho de vía, el tipo de pavimento, las condición

climática, entre otras.

En otros países, como EE.UU. se han realizado estudios, para la elaboración de modelos de predicción, siguiendo metodologías bastante exigentes. Sin embargo, estos modelos no se ajustan a las condiciones de nuestro país, toda vez que nuestros departamentos tienen factores particulares y únicos que afectan, la velocidad de operación. Estos factores según Jorgensen y Polak [6] son: el estado de la carretera, la pericia del conductor, el tipo de vehículo, las condiciones de tránsito y el entorno del tramo.

El tipo de investigación realizado, es correlacional, toda vez que se generaron modelos de predicción de velocidades de operación, usando como variable regresora la inversa del radio. Con la investigación se busca predecir la diferencia de velocidades de operación entre elementos horizontales sucesivos, con el fin de realizar un análisis de consistencia geométrica para un trazado vial de 1 Km.

DESARROLLO TEÓRICO

Como primera etapa, se realizó la caracterización geométrica de los tramos de vía que conectan Bogotá - Choachí, Patios - Guasca - Salitre - Sopo, haciendo uso de información secundaria [5], en términos de radios de curva, pendientes y velocidad de diseño para cada curva analizada. Se encontró que la asignación de velocidades de diseño se realizó en función del radio mínimo y la pendiente máxima, parámetros establecidos en el manual de diseño geométrico INVIAS 2008 [1]. La caracterización geométrica se hizo con el fin de establecer las velocidades de diseño de cada tramo de estudio, arrojando los siguientes resultados: Bogotá - Choachí (30 km/h), tramo Patios - Guasca (30 Km/h hasta 70 km/h).

Una vez revisada la caracterización geométrica, se filtraron las curvas horizontales que se encontraran en pendiente continua, es decir, aquellas donde la curva horizontal coincide con una recta vertical y no con una curva vertical. Esto redujo las curvas de estudio a más del 50 % de la población.

Se seleccionaron las curvas horizontales que estuvieran dentro de un mismo tramo homogéneo, es decir, curvas que tuvieran igual velocidad de diseño. Se determinaron tramos homogéneos que tuvieran mínimo 5 curvas horizontales sucesivas, que tuvieran una tangente vertical, esto con el fin de asegurar que las velocidades de operación de las curvas horizontales no se vieran afectadas por otras condiciones geométricas. Como segunda fase, se identificaron los modelos teóricos existentes y técnicamente equiparables con el objeto de esta investigación y que pudieran ser comparados con los modelos propios.

Para estos efectos comparación (Tablas 1, 2 y 3), se consideraron modelos que presentaran rangos de pendiente de: $(0\% < G < 4\%)$, $(4\% < G < 9\%)$, $(-9\% < G < -4\%)$ y $(-4\% < G < 0\%)$. Lo anterior, para una velocidad de operación de 60 km/h y considerando un percentil del 85% (V85).

Tabla 1. Ecuaciones validadas y construidas para Colombia.

Condición de alineamiento _ Curva horizontal en pendiente _ (%)	Ecuación
$0\% < G < 4\%$	$V_{85} = 94.39 - (3188.66/R)$
$4\% < G < 9\%$	$V_{85} = 37.18 + (0.1 \cdot R) + (0.04R_{n-1})$
$-9\% < G < -4\%$	$V_{85} = 35.43 + (0.219 \cdot R)$
$-4\% < G < 0\%$	$V_{85} = 105.98 - (3709.90/R)$

Fuente: Adaptado de Ordoñez [4]

Las ecuaciones de la tabla 1, fueron validadas y desarrolladas por Ordoñez, para carreteras rurales de dos carriles, en el departamento del Cauca.

Tabla 2. Modelos de predicción de velocidades de operación desarrollados y validados en Estados Unidos.

Condición de alineamiento _ Curva horizontal en pendiente _ (%)	Ecuación
$0\% < G < 4\%$	$V_{85} = 104.82 - (3574.51/R)$
$4\% < G < 9\%$	$V_{85} = 96.61 - (2752.19/R)$
$-9\% < G < -4\%$	$V_{85} = 102.1 - (3077.13/R)$
$-4\% < G < 0\%$	$V_{85} = 105.98 - (3709.90/R)$

Fuente: Adaptado de IHSM 2000 [7]

Las ecuaciones de la tabla 2, fueron desarrolladas para carreteras rurales de dos carriles, con densidad de accesos de 3 por kilómetro. La velocidad de diseño es de 120 Km/h, los radios varían desde 110m hasta 3500 m, y el volumen de tráfico vehicular es de 500 a 4000 vehículos por día.

Tabla 3. Modelos de predicción de velocidades de operación desarrollado y validado en Cuba.

Condición de alineamiento _ Curva horizontal en pendiente _ (%)	Ecuación
$0\% < G < 4\%$	$V_{85} = 77.212 - (1435.599/R)$
$4\% < G < 9\%$	$V_{85} = 77.937 - (2593.417/R)$
$-9\% < G < -4\%$	$V_{85} = 74.685 - (586.299/R)$
$-4\% < G < 0\%$	$V_{85} = 77.43 - (1026.266/R)$

Fuente: Adaptado de Carreras [8].

Otro modelo desarrollado en Colombia, fue desarrollado por Ascencio [9], en la vía que conduce de Bogotá a Villavicencio. El autor desarrolló únicamente un modelo para determinar las velocidades de operación en curvas horizontales con pendientes desde el -9% hasta el 9%, usando el radio como variable regresora.

$$V_{op} = (0.1586 \cdot R) + 51.366 \quad (1)$$

Fuente: Ascencio [9]

Donde:

$R =$ Radio

$V_{op} =$ Velocidad de operación.

Para la construcción de los modelos de velocidades de operación, se tomaron como base el manual de diseño geométrico de Colombia INVIAS 2008 [1], el manual de diseño geométrico de EE UU AASHTO [10] y el manual IHSM 2000 [7]. Se definió que la velocidad de operación, corresponde al percentil 85. La construcción de los modelos

de predicción de las velocidades de operación se realizó usando como variable regresora la inversa del radio, considerando lo plasmado en el documento “Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways” [7], en donde se muestra el análisis de correlación y las pruebas de la variable significativa (T-Student), para 48 curvas horizontales en rampa y pendiente, realizados con el fin de construir los modelos de predicción de velocidad de operación adoptados por el manual IHSDM 2000 [7]. Las variables que se investigaron para la construcción del manual “Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways” [7] fueron: radio (R), inversa del radio (1/R), $R^{0.5}$, longitud de la curva (L), peralte (e), relación peralte-radio (e/R). El análisis de significancia de variables independientes y el análisis de correlación demostró que el índice de correlación más fuerte fue la relación (1/R) [7]. Por lo anterior, el presente estudio utilizó la relación (1/R) para la construcción de los modelos de predicción de velocidades de operación.

El número mínimo de datos para calcular la velocidad de operación por curva, se definió de acuerdo al cálculo de la siguiente fórmula:

$$n = ((K \cdot S) / e)^2 \quad (2)$$

Fuente: Cal y Mayor [11]

Donde:

n = número mínimo de datos

S = desviación estándar

e = error permitido en el estimado de la velocidad.

K = constante nivel de confianza deseado.

Para este caso, el nivel de confianza deseado fue del 95.5%, lo que equivale a $K=2$. El error permitido fue de 2.5km/h, que corresponde a la precisión del radar Bushnell [12] y la desviación estándar de 5 Km/h, corresponde al valor típico de la encontrado en campo. Así la muestra mínima calculada fue de 16, y para efectos prácticos se redondeó a 20 datos por curva/sentido.

TRABAJO DE CAMPO

Para la obtención de las velocidades de operación, sus registros puntuales deben ser tomados bajo condiciones de flujo libre, según manda el manual Highway Capacity 2000 [13]. El flujo libre, es el tráfico no afectado por las condiciones de tránsito arriba o abajo, en otras palabras, es la hora de menor demanda vehicular. Para el registro de velocidades puntuales se utilizó un radar marca Bushnell con rango de medición de entre 16 Km/h y 177 Km/h y precisión de captura de +/- 2Km/h.



Figura 1. Radar de velocidad Bushnell 101911.

Fuente: Bushnell 2013 [12]

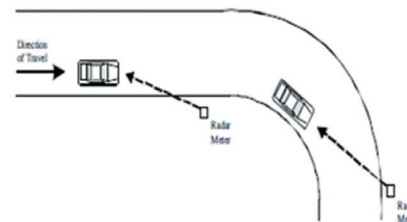


Figura 2. Ubicación para la toma de velocidades puntuales en curvas horizontales con Radar.

Fuente: IHSDM 2000 [7]

Como se puede ver en la figura 2, la ubicación recomendada para la toma de velocidades puntuales en curvas horizontales es frente a la dirección de recorrido del vehículo. Las velocidades fueron tomadas los días sábado y domingo, entre las 8:00

y las 16:00 horas y en los meses de noviembre de 2018, enero y febrero de 2019. La identificación y Georreferenciación de las curvas en las cuales se midió la velocidad de operación, se presenta a continuación para cada uno de los tramos:

Tabla 4. Ubicación de curvas objeto de estudio, Tramo Bogotá – Choachí

No. curva	Latitud	Longitud
6	4.594877°	-74.066182°
13	4.593953°	-74.065139°
19	4.594924°	-74.064140°
22	4.593516°	-74.065060°
48	4.588282°	-74.060521°

No. curva	Latitud	Longitud
49	4.588527°	-74.058884°
50	4.589474°	-74.060525°
51	4.590273°	-74.060583°
54	4.591987°	-74.060888°

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Ubicación de curvas objeto de estudio, Tramo Patios – Guasca

No. curva	Latitud	Longitud
1	5.037115°	-73.804182°
4	5.012133°	-73.810878°
6	5.008777°	-73.807091°
7	5.009683°	-73.806274°
8	5.008070°	-73.805246°

No. curva	Latitud	Longitud
9	5.005070°	-73.808220°
10	4.971214°	-73.816577°
19	4.910235°	-73.865348°
20	4.906305°	-73.871904°
21	4.897246°	-73.877653°

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el cálculo de la velocidad de operación para una curva horizontal, en este caso se seleccionó aleatoriamente la curva número 10, del tramo Patios-Guasca, su posición

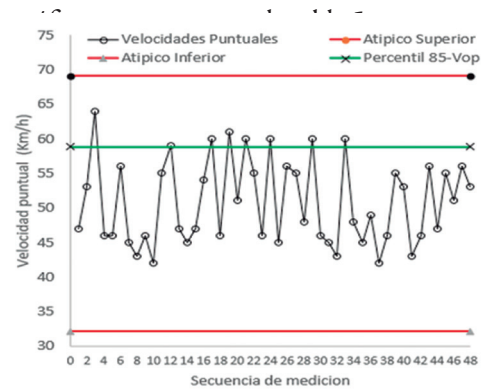


Figura 3. Cálculo de la velocidad de operación _ Curva N° 10 _ Tramo Patios - Guasca.

Fuente: elaboración propia

Se puede ver en la Figura 4 que, en la toma de datos, no existió ningún dato atípico. Los datos atípicos de cada curva, fueron depurados por medio del cálculo del umbral superior e inferior, retirando aquellos datos que estaban por fuera de los límites permitidos. Los límites atípicos superior e inferior se calcularon en función de los parámetros descritos en la tabla 6.

Tabla 6. Análisis estadístico obtención límite atípico superior e inferior

Desviación estándar (km/h)	Percentil 85	Cuartil 3 (Km/h)	Cuartil 1 (Km/h)	Intervalo (Km/h)	Atípico Inferior (Km/h)	Atípico superior (Km/h)
5.43	58.85	55.25	46,0	13.87	32.12	69.12

Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN RESULTADOS

Los resultados del trabajo de campo se categorizaron en tres grupos, en función de la Velocidad de diseño (km/h) y del rango de Pendiente (%):

Grupo 1:

Velocidad de diseño: VTR 50 km/h

Pendientes: 0% a 4% _ 0% a -4%

Tabla 7. Velocidad de operación VTR 50, pendiente 0% a 4% y 0% a -4%

Pi	Radio (m)	Velocidad de Operación (km/h) Pendientes en el rango (0% a 4%)	Velocidad de Operación (km/h) Pendientes en el rango (0% a -4%)

C1	156	73,65	68,2
C2	303	71,8	67
C3	204	67,35	69,3
C5	183	69,6	69,4
C16	77	53	55
C17	55	53,3	49,65
C18	94	57	56
Promedio:		63,67	62,08

Fuente: Elaboración propia

El promedio de las velocidades de operación, para la anterior tabla es de 63.67 km/h para pendientes del 0% a 4% y de 62.08 km/h para pendientes del 0% a -4%. Esto indica que los usuarios conducen de manera similar tanto en ascenso como en descenso.

Grupo 2:

Velocidad de diseño: VTR 50 km/h

Pendiente: 4% a 9% _ -4% a -9%

Tabla 8. Velocidad de operación VTR 50, pendiente -4% a -9% y 4% a 9%

Pi	Radio (m)	Velocidad de Operación (km/h) Pendientes en el rango (-4% a -9%)	Velocidad de Operación (km/h) Pendientes en el rango (4% a 9%)
C1	156	68,2	73,65
C4	98	64	65
C6	289	72	61,9
C7	466	62,55	56,65
C8	206	65	60
C9	148	62	60
C10	76	58,85	51
C19	117	64	58,6
C20	148	68	59,8
C21	94	57	52,4
Promedio:		64,16	59,9

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, las velocidades reales de operación en un tramo con velocidad de diseño de 50 km/h, se registran velocidades en cerca de 20

km/h por encima del límite. De la tabla 8, se puede denotar que el valor promedio de las velocidades de operación para un intervalo de pendiente de 4% a 9% es de 59.9 km/h, mientras que para un intervalo de pendiente de -4% a -9% es de 64.16 km/h, lo que indica que las velocidades de operación aumentan considerablemente en pendiente de descenso.

Se aprecia en la curva 10, que corresponde a un radio de 76 m, y para pendiente en descenso, que la velocidad de operación es de 58.85 km/h, comparado con la velocidad de operación de ascenso que es de 51 km/h, así mismo nótese las diferencias para las curvas 6, 7, 8, 9, entre otras que muestran que las velocidades de operación son mayores para los intervalos de pendiente de -4% a -9%, comparado con el intervalo de 4% a 9%. Esto indica que la agrupación de curvas de acuerdo con intervalos de pendiente es adecuada, para la construcción de modelos de velocidades de operación, toda vez que, para un mismo radio y pendientes opuestas, la diferencia fue de 7.85 km/h.

Grupo 3:

Velocidad de diseño: VTR 30 km/h

Pendiente: 4% a 9% _ -4% a -9%

Tabla 9. Velocidad de operación VTR 30, pendiente 4% a 9% y -4% a -9%

Pi	Radio (m)	Velocidad de Operación (km/h) Pendientes en el rango (4% a 9%)	Velocidad de Operación (km/h) Pendientes en el rango (-4% a -9%)
C6	21	33,95	30,05
C13	25	35,05	38
C19	170	36,85	45
C22	22	39,4	
C48	80	50,4	51
C49	28	39,7	35
C50	60	45,1	45,05
C51	100	46	47
C52	42	36	
C54	40	37	37,05
C55	35	37,15	39,4

C59	29	36	36,15
C67	68	45	47,15
C71	62	39	42
Promedio:		39,76	41,07

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, las velocidades de operación para un tramo de 30 km/h, están por encima del valor diseñado, máximo en alrededor de 20 km/h. Así mismo se puede notar que el promedio de las velocidades de operación para un intervalo de pendiente de 4% a 9% es de 39.76 km/h, mientras que para un intervalo de pendiente de -4% a -9% es de 41.07 km/h, lo que indica que las velocidades de operación aumentan en pendiente de descenso.

Un análisis particular se generó a partir de algunos datos identificados en las tablas N°8 y N°9. Obsérvese lo siguiente:

VTR 30 km/h (No. Curva 51 _ Tabla 9)
Pendiente: 4% a 9% _ Radio de 100 m
Velocidad de operación: 46 km/h

VTR 50 km/h (No. Curva 4 _ Tabla 8)
Pendiente: 4% a 9% _ Radio de 97 m
Velocidad de operación: 65 km/h

En función de la velocidad de diseño (VTR 30 y 50 km/h), se reconoció la similitud entre los radios y las pendientes, y simultáneamente se identificó la variación de la velocidad de operación (46 y 65 km/h). Esto indica que los modelos de velocidad de operación se deben construir en función de la velocidad de diseño del tramo homogéneo.

Una vez caracterizadas las curvas de estudio y finalizada la etapa de cálculo de las velocidades de operación, se generaron las ecuaciones que soportan los seis (6) modelos propuestos (Ver tabla 10).

Tabla 10. Modelos obtenidos en los tramos de estudio.

N	VTR	Ecuaciones Velocidad de Operación _ Modelos propuestos.	Coefficiente de determinación R ²	Intervalo radio (m)	Pendiente (%)
1	50	$-1489.7 \cdot 1/R + 76.848$	0.79	76-305	0% a 4%
2	50	$-1461.4 \cdot 1/R + 75.004$	0.90	76-305	0% a -4%
3	50	$-1194.8 \cdot 1/R + 66.916$	0.89	76-305	4% a 9%
4	50	$-1313.6 \cdot 1/R + 75.143$	0.73	76-305	-4% a -9%
5	30	$-383.73 \cdot 1/R + 50.207$	0.72	21-100	4% a 9%
6	30	$-517.85 \cdot 1/R + 54.43$	0.95	21-100	-4% a -9%

Fuente: elaboración propia.

A los modelos propuestos, se les aplicó la prueba del “Chi cuadrado” con el objeto de medir la calidad del ajuste de los datos y hacer la comparación de la frecuencia esperada con las frecuencias de la muestra [14]. A continuación, se muestra la comparación de los modelos propios con los modelos teóricos.

Comparación modelos propios Vs. teóricos (intervalo de 0% a -4% y 0% a 4%)

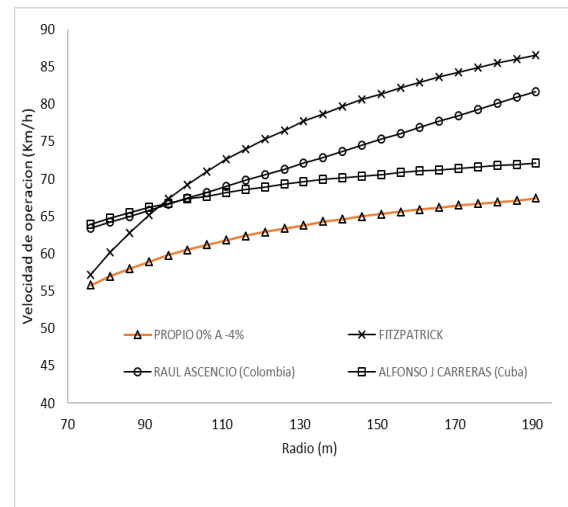


Figura 4. Comparación modelos de predicción de velocidades de operación pendiente del 0% a -4%.

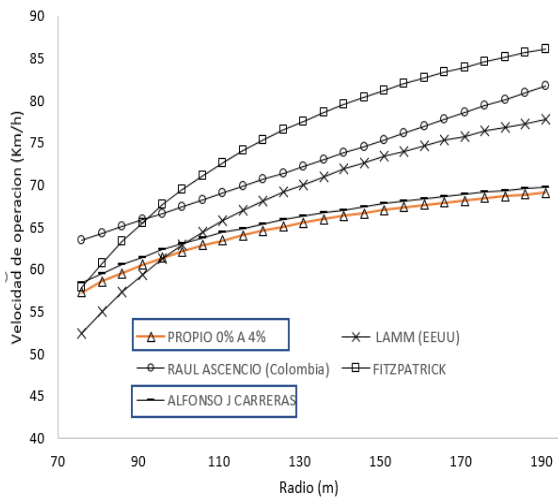


Figura 5. Comparación modelos de predicción de velocidades de operación pendiente del 0% a 4%

De la figura 4 se observa que ningún modelo teórico, se ajusta al modelo desarrollado en la presente investigación. La figura número 5 muestra claramente que los modelos desarrollados en EE. UU, por los autores Fitzpatrick y Lamm, no se ajustan al modelo propio, esto debido a que el tramo vial objeto de estudio tiene una velocidad de diseño de 50 km/h, mientras que los tramos estudiados en los EE. UU, presentan una velocidad de diseño de 120 km/h.

Comparación modelos propios Vs. teóricos (intervalo de 4% a 9%)

Se identifica un modelo que se ajusta a las condiciones topográficas de nuestro país, el cual fue desarrollado en Cuba, sin embargo, éste fue concebido para velocidades de diseño de 60 km/h.

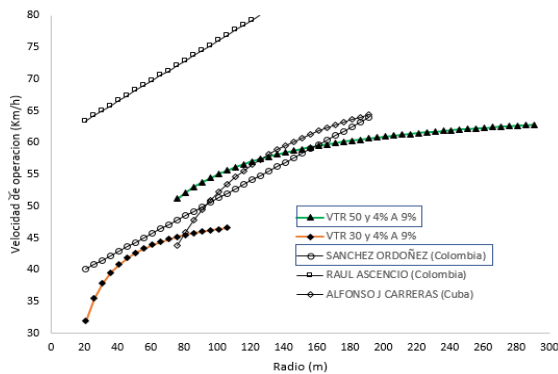


Figura 6. Comparación modelos de predicción de velocidades de operación pendiente del 4% a 9%.

La figura número 6 muestra que las velocidades de operación para el modelo propio “VTR30 _ 4% a 9%” son menores que las velocidades de operación predichas por el modelo propio “VTR50 _ 4% a 9%”. Por otro lado, se encontró que el modelo de “SANCHEZ ORDOÑEZ (Colombia)”, se ajusta al modelo propio “VTR50 _ 4% a 9%”, únicamente para el intervalo de radios desde 76 m hasta 191 m. El radio de 76 m corresponde al radio mínimo para una velocidad de diseño de 50 Km/h y el radio de 191m, corresponde al radio máximo, usado por el autor Sánchez Ordoñez, para la construcción del modelo.

Comparación modelos propios Vs. teóricos (intervalo de -4% a -9%)

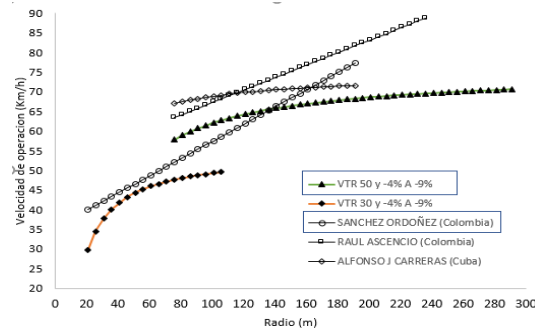


Figura 7. Comparación modelos de predicción de velocidades de operación pendiente del -4% a -9%.

La figura número 7 muestra que las velocidades de operación para el modelo propio “VTR30 _ -4% A -9%” son menores que las velocidades de operación predichas por el modelo propio “VTR50 _ -4% A -9%”, para un mismo radio.

Por otro lado, se encontró que el modelo “SANCHEZ ORDOÑEZ (Colombia)”, se ajusta al modelo propio “VTR50 _ -4% -9%”, únicamente para el intervalo de radios entre 76 m y 191 m. El radio de 76 m corresponde al radio mínimo para una velocidad de diseño de 50 Km/h y el radio de 191m, corresponde al radio máximo, usado por el autor Ordóñez, para la construcción del modelo.

Respecto del análisis de las figuras 4, 5, 6 y 7 se puede aclarar que, los modelos propuestos por los autores no se ajustan plenamente a los

modelos de contraste, ya que cada uno de ellos está concebido para unas condiciones específicas, particularmente en lo referente a las velocidades y pendientes. Sin embargo, también es de resaltar que la literatura no es tan amplia en este aspecto, y por ende la comparación debe desarrollarse con lo que el estado del arte expone.

Finalmente, se realizó el análisis de consistencia geométrica, sobre un tramo de vía ubicado en el departamento de Antioquia, usando los modelos propios. La información topográfica para realizar el diseño, fue obtenida de WSP by Concol [15]. Las características del diseño geométrico realizado son las siguientes:

Tabla 11. Diseño geométrico horizontal y vertical "Antioquia"

Abscisa	Radio (m)	Elemento	Velocidad Especifica (km/h)	Pendiente (%)
16		Línea	30	1.08
69	78	C1	30	1.08
106		Línea	30	1.08
153	60	C2	30	9.16
223		Línea	30	9.16
305	50	C3	30	9.16
479		Línea	30	9.16
656	50	C4	30	9.16
781		Línea	30	PIV
886	100	C5	30	-6.79
934		Línea	30	-6.79
992	85	C6	30	-6.79
1071		Línea	30	-6.79
1153	30	C7	30	-6.79
1208		Línea	30	-6.79
1260	27	C8	30	-6.79
1320		Línea	30	-6.79
1373	27	C9	30	-6.79
1505		Línea	30	PIV
1668	67	C10	30	8.84
1749		Línea	30	8.84
1796	40	C11	30	8.84
1852		Línea	30	8.84

Abscisa	Radio (m)	Elemento	Velocidad Especifica (km/h)	Pendiente (%)
1934	55	C12	30	PIV
2015		Línea	30	-7.81
2067	30	C13	30	1.86
2103		Línea	30	1.86
2140	40	C14	30	1.86
2176		Línea	40	1.86
2225	50	C15	40	1.86
2326		Línea	40	1.86
2465	73	C16	40	1.86
2553		Línea	50	1.86
2617	120	C17	50	-2.17
2710		Línea	50	-2.17
2799	85	C18	50	-2.17
2871		Línea	50	-2.17
3039	150	C19	50	-2.17
3228		Línea	50	PIV
3353	73	C20	50	2.49
3479		Línea	50	2.49
3587	85	C21	50	2.49
3662		Línea	50	2.49
3715	74	C22	50	2.49
3780		Línea	50	

Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de mostrar la eficiencia del análisis de consistencia geométrica, se indujeron de las curvas 6, 7, 19 y 20 (85, 30, 150 y 73 metros respectivamente _ Ver Tabla 11), cuyos resultados derivaron en el no cumplimiento de la relación

de radios establecida en el manual de diseño geométrico del Instituto Nacional de Vías [1] , el cual dicta que esta relación debe variar máximo 1.5 veces el radio contiguo. A continuación, se muestra el análisis de consistencia geométrica

realizado para los datos consignados en la tabla 11. Cabe aclarar que se usó el criterio I y II de Lamm [2], con el fin de realizar el análisis de consistencia geométrica. El criterio I es usado para mostrar las diferencias de las velocidades de diseño con las

velocidades de operación predichas, mientras que el criterio II, es usado para establecer las diferencias de velocidades de operación, entre curvas sucesivas.

Tabla 12. Análisis de consistencia geométrica tramo "Antioquia"

Curva Nº	Pendiente (%)	Radio (m)	Velocidad Propuesta para validación de los modelos (km/h)	Velocidad operación calculada a partir de los modelos propios (km/h)	Criterio I Lamm [2]	Criterio II Lamm [2]
C1	1.1	78	30	No existe ecuación	-	-
C2	9.2	60	30	43.81	13.81	0.00
C3	9.2	50	30	42.53	12.53	1.28
C4	9.2	50	30	42.53	12.53	0
C5	-6.8	100	30	49.25	19.25	0
C6	-6.8	85	30	48.34	18.34	0.91
C7	-6.8	30	30	37.17	7.17	11.17
C8	-6.8	27	30	35.25	5.25	1.92
C9	-6.8	27	30	35.25	5.25	0.00
C10	8.8	67	30	44.48	14.48	0.00
C11	8.8	40	30	40.61	10.61	3.87
C12	PIV	55	30	No existe	-	-
C13	1.9	30	30	No existe	-	-
C14	1.9	40	30	No existe	-	-
C15	1.9	50	40	No existe	-	-
C16	1.9	73	40	No existe	-	-
C17	-2.2	120	50	62.83	12.83	-
C18	-2.2	85	50	57.81	7.81	5.02
C19	-2.2	150	50	65.26	15.26	0.00
C20	2.5	73	50	56.44	6.44	8.82
C21	2.5	85	50	59.32	9.32	0.00
C22	2.5	74	50	56.72	6.72	2.61

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 se pueden identificar dos inconsistencias generadas a propósito en la etapa de diseño. La primera de ellas se identifica entre las curvas C6 y C7, con una etiqueta de 11.17, dicha etiqueta obedece, a que existe una diferencia de 11.17 km/h, causada por los radios sucesivos de 85

m y 30 m. Según la normatividad INVIAS 2008 [1], el radio de 30 m debería ser reemplazado por un radio de 57 m, con el fin de cumplir la relación entre radios sucesivos, el cual dicta que esta relación debe ser de máximo 1.5 veces el radio contiguo.

La segunda inconsistencia se puede ver entre las curvas C19 y C20, con una etiqueta de 8.82, dicha etiqueta obedece, a que existe una diferencia de 8.82 km/h, causada por los radios sucesivos de 150 m y 73 m. Según la norma INVIAS 2008, el radio de 73 m debería ser reemplazado por un radio de 100m, con el fin de cumplir la relación entre radios sucesivos, el cual dicta que esta relación debe ser de máximo 1.5 veces el radio contiguo.

CONCLUSIONES

Para la construcción de modelos de velocidades de operación se deben tener en cuenta: la velocidad de diseño y la pendiente.

La variable regresora $1/R$, permite obtener modelos, con coeficientes de correlación mayores a 0.7. Dichos coeficientes indican entonces que el 70% de la variabilidad de la velocidad de operación, puede ser explicado con la variable regresora propuesta. Todo lo anterior según se indica en la tabla N° 9.

De acuerdo con el análisis de consistencia geométrica realizado al tramo diseñado, se encontró que la consistencia está relacionada con el cumplimiento de la relación de radios y la homogeneidad de la velocidad específica.

Los modelos obtenidos en esta investigación fueron desarrollados considerando los siguientes criterios: Intervalo de radios, Pendiente, Velocidad de diseño, Flujo libre, Tránsito Promedio Diario menor a 2000, Pavimento flexible en buen estado, vía bidireccional, ancho de carril menor que 3.5 m, ausencia de bermas y peraltes menores al 8%.

Se encontró que los modelos desarrollados por otros autores, usaron como variable de predicción de la velocidad de operación, la inversa del radio y el radio, así mismo se determinó que los modelos desarrollados en EE UU, Cuba, y Colombia fueron desarrollados en carreteras bidireccionales con velocidades de diseño de 120 Km/h, 60 Km/h y 40-60 Km/h, respectivamente. Por otro lado, se encontró que los modelos teóricos desarrollados, por otros autores fueron desarrollados para cuatro

grupos de pendientes, 0% a 4%, 4% a 9%, 0% a -4% y -4% a -9%. Finalmente, se asignaron los modelos teóricos para cada condición caracterizada, de acuerdo con la velocidad de diseño, la pendiente, y el radio, según apliquen.

Se encontró que la variable regresora $1/R$, permitió obtener modelos de predicción, que se ajustan mejor a las condiciones topográficas de Colombia, con coeficientes de correlación mayor que 0.7. Dichos coeficientes indican que el 70% o más de la variabilidad de la velocidad de operación puede ser explicado con la variable regresora propuesta. Los modelos obtenidos se deben usar y aplicar con debida precaución, solamente en el intervalo de radios en que se realizaron los estudios, así mismo se deben aplicar de acuerdo con la velocidad de diseño y la pendiente.

Por otro lado, al realizar la construcción de los modelos propios, se determinó que la velocidad de operación está en función de la velocidad de diseño del tramo homogéneo, esto se tuvo en cuenta para construir dos grupos de modelos de predicción, el primero para 30Km/h y el segundo para 50 Km/h.

Los modelos teóricos que mejor se ajustan con los modelos propios, son aquellos que tienen diferencias menores o iguales que 10Km/h, en la variable velocidad de diseño, por lo tanto, el criterio que se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar un modelo para realizar un análisis de consistencia geométrico, es la velocidad de diseño de la vía en la que se obtuvieron las velocidades de operación.

Todas las velocidades puntuales fueron obtenidas con ángulos de incidencia menores que 15 grados, se pudo comprobar que la incidencia del ángulo mayor que 15 grados, puede afectar de manera significativa la velocidad real del vehículo. Para minimizar este error, se aplicaron las medidas, según lo indica el manual IHSDM 2000 [10], en la dirección de flujo del vehículo, es decir aproximadamente en el inicio (PC) o final de la curva (PT).

De acuerdo con la experiencia obtenida en la presente investigación, se recomienda realizar

mediciones de velocidades puntuales, con sensores piezoeléctricos, para no afectar la velocidad de operación, toda vez que los conductores disminuyen la velocidad del vehículo (moderadamente), al ver un radar de velocidad, y esto podría subestimar los valores de velocidad de operación reales en las curvas de estudio.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Vías, «Manual de diseño geométrico de carreteras,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/985-manual-de-dise-no-geométrico?format=html>. [Último acceso: 24 09 2018].
- [2] R. Lamm, P. Basil y . T. Mailaender, Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook, Nueva York: McGraw-Hill handbooks, 1999.
- [3] C. G. CASTELLANOS BARRERO, «bdigital REPOSITORIO INSTITUCIONAL UN,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/966/1/carlosgeovannycastellanosbarrero.2008.pdf>. [Último acceso: 06 09 2018].
- [4] J. F. S. Ordóñez, «Archivo Digital UPM,» 05 07 2012. [En línea]. Available: http://oa.upm.es/11371/1/JOSE_FERNANDO_SANCHEZ_ORDO%C3%91EZ.pdf. [Último acceso: 19 08 2018].
- [5] Á.J.VITERICALÁN y J.H.GONZÁLEZ MUÑOZ, «Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás,» 2017. [En línea]. Available: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9129>. [Último acceso: 19 09 2018].
- [6] F. Jorgensen y J. Polak, «The effect of personal characteristics on drivers' speed selection. An economic approach,» Journal of Transport Economics and Policy, vol. 3, nº 27, pp. 237-252, 1993.
- [7] K. Fitzpatrick, L. Elefteriadou, D. Harwood, J. Collins, McFadden y et al, «Federal Highway Administration,» 15 08 2000. [En línea]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/ihsdm/99171/99171.pdf>. [Último acceso: 19 08 2018].
- [8] A. J. Carreras valdes, «Repositorio institucional Universidad central Marta Abreau de las Villas,» 2010. [En línea]. Available: <http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/5230/Tesis-%20Alfonso%20J.%20Carreras.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 06 03 2019].
- [9] R. E. M. ASCENCIO, «Biblioteca Digital Escuela Colombiana De Ingenieria Julio Garavito,» 07 03 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/759/1/Mora%20Ascencio%2C%20Ra%C3%BA1%20Enrique%20-%202018.%20pdf>. [Último acceso: 19 08 2018].
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, united states of america: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [11] J. Cardenas y R. cal y mayor, Ingenieria de transito, Mexico: Alfaomega, 2007.
- [12] «Bushnell,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.bushnell.com/Products/Speed-Guns/Velocity/Velocity-Speed-Gun/?sku=101911>. [Último acceso: 15 enero 2019].
- [13] National Cooperative Highway Research

Program, Highway Capacity Manual, 2000.

- [14] Minitab, «Soporte Minitab,» 2018. [En línea]. Available: [https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/tables/supporting-topics/chi-](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/tables/supporting-topics/chi-square/what-is-a-chi-square-test/)

[square/what-is-a-chi-square-test/](https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/tables/supporting-topics/chi-square/what-is-a-chi-square-test/). [Último acceso: 28 09 2018].

- [15] WSP COLOMBIA SAS, «Informe Topografico Antioquia,» 2019.