

**Estudio de la Consistencia en el Trazado del Tramo de la Carretera de la Red Vial 45A07
Ubicado entre el PR68 y el PR78 Mediante el Análisis de la Velocidad de Operación**

Luis Carlos Caicedo Barrera

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
Magister en Ingeniería Civil**

Director(a):

MSc. Norma Cristina Solarte Vanegas



Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Nota de Aceptación

Firma del Director

Firma del Jurado N°1

Firma del Jurado N°2

Bucaramanga, 28 de septiembre de 2018

Dedicatoria

Dedico este proyecto:

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido siempre el soporte y compañía durante toda mi vida.

A toda mi familia que siempre han estado pendientes de toda tarea que he emprendido.

A mi esposa e hijo que este esfuerzo siempre ha sido pensando en nuestro futuro.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil.

Y de una manera muy especial a todos mis compañeros del Departamento de Ciencias Básicas pues siempre tengo presente el sentimiento que ellos profesan para que esto se logre.

Agradecimientos

A mi director de tesis MSc. Norma Cristina Solarte Vanegas por su colaboración, orientación y apoyo para la realización de este proyecto.

A los docentes de la Maestría en Ingeniería Civil por todas sus enseñanzas.

Al PhD Emilio Germán Moreno González por su aporte en el desarrollo del modelo estadístico para obtención de resultados.

A mis compañeros del Departamento de Ciencias Básicas quienes dedicaron algo de su valioso tiempo para la toma de datos en campo.

A la Universidad pontificia Bolivariana por darme el apoyo necesario para terminar con éxito el estudio de maestría.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Planteamiento del Problema	16
1.1 Objetivos de la Investigación.....	17
1.2 Etapas de la Investigación.....	17
2. Marco Teórico.....	18
2.1 Consistencia.....	18
2.2 Criterios para Evaluar la Consistencia	18
2.2.1 Criterio basado en la estabilidad del vehículo	19
2.2.2 Criterio basado en índices de trazado	20
2.2.3 Criterio basado en la Carga de trabajo del Conductor	21
2.2.4 Criterio basado en la Velocidad DE operación.....	23
2.3 Definición de Velocidad	25
2.3.1 Velocidad de Diseño (V_{TRH})	26
2.3.2 Velocidad Específica de un Elemento (V_e).....	26
2.3.3 Velocidad de Operación (V_{85})	27
2.4 Modelos para la Estimación de la Velocidad de Operación	27
2.4.1 Cálculo de la Velocidad de Operación Mediante perfiles de Velocidad	27
2.4.2 Cálculo de la Velocidad de Operación en Curvas	28
2.4.3 Cálculo de la Velocidad de Operación en Rectas	31
2.4.4 Estimación de los Cambios de la Velocidad de Operación en la transición Recta-Curva...	35

2.5 Modelos para Medir la Consistencia Basados en la Velocidad de Operación.....	37
2.5.1 Modelos de Evaluación Local de la Consistencia.....	38
2.5.2 Modelos de Evaluación Global de la Consistencia.....	39
3. Metodología.....	42
3.1 Localización y estudio del tramo de vía a evaluar.....	42
3.1.1 Diseño Geométrico.....	44
3.1.2 Volúmenes de Transito en el Tramo.....	45
3.1.3 Accidentalidad en el Tramo.....	46
3.2 Procedimiento para toma de Datos en Campo.....	55
3.2.1 Calibración del Equipo Video VBox.....	55
3.2.2 Toma de Velocidades.....	58
3.3 Análisis de los Datos Tomados en Campo.....	60
3.3.1 Procesamiento de los datos obtenidos con el equipo Video BOX.....	60
3.3.2 Procedimiento en el Wolfram Mathematica para el cálculo de la velocidad de operación.....	61
3.3.3 Desarrollo de los perfiles de velocidad.....	64
4. Resultados.....	65
4.1 Velocidad de operación de las curvas horizontales.....	65
4.2 Comparación de la Velocidad de operación con la Velocidad de Diseño de las curvas horizontales.....	67
5. Análisis de Resultados.....	76
5.1 Comparación de la velocidad de operación con la velocidad de diseño de las curvas horizontales.....	76

5.2 Análisis de Consistencia	77
5.3 Análisis Estadístico	80
5.3.1 Análisis de regresión múltiple del modelo para calcular la velocidad de operación V_{85}	87
6. Conclusiones	96
7. Recomendaciones	100
Referencias Bibliográficas	108

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Niveles de consistencia basados en la estabilidad del vehículo</i>	20
Tabla 2. <i>Relación entre parámetros referentes a diferenciales de velocidad</i>	36
Tabla 3. <i>Modelos para la estimación de parámetros referentes a diferenciales de velocidad</i>	37
Tabla 4. <i>Niveles de consistencia según criterios basados en la velocidad de operación</i>	39
Tabla 5. <i>Umbrales para la determinación de la consistencia global de Polus et al</i>	41
Tabla 6. <i>Umbrales del modelo global de consistencia de Polus et al.</i>	41
Tabla 7. <i>Volúmenes de Tránsito</i>	46
Tabla 8. <i>Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 2015</i>	47
Tabla 9. <i>Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2015.</i>	48
Tabla 10. <i>Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 201</i>	49
Tabla 11. <i>Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2016.</i>	49
Tabla 12. <i>Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 2017</i>	50
Tabla 13. <i>Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2017</i>	51
Tabla 14. <i>Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 2018</i>	52
Tabla 15. <i>Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2018.</i>	53
Tabla 16. <i>Accidentalidad del tramo en estudio por año</i>	54
Tabla 17. <i>Velocidades para calibración</i>	56
Tabla 18. <i>Ejemplo de velocidades de conductores</i>	61
Tabla 19. <i>Velocidad de operación de las curvas horizontales, en el sentido Curos-Lomas del Viento.</i>	65

Tabla 20. <i>Velocidad de operación de las curvas horizontales, en el sentido Lomas del Viento-Curos</i>	66
Tabla 21. <i>Umbral de Lamm et al, según criterio I, sentido Curos-Lomas del Viento</i>	68
Tabla 22. <i>Umbral de Lamm et al, según criterio I, sentido Lomas del Viento-Curos</i>	70
Tabla 23. <i>Umbral de Lamm et al, según criterio II, sentido Curos-lomas del viento</i>	72
Tabla 24. <i>Umbral de Lamm et al, según criterio II, sentido Lomas del Viento-Curos</i>	74
Tabla 25. <i>Diferencia de velocidades mínima, máxima, promedio en el sentido Curos-Lomas del Viento</i>	76
Tabla 26. <i>Diferencia de velocidades mínima, máxima, promedio en el sentido Lomas del Viento-Curos</i>	77
Tabla 27. <i>Evaluación de la consistencia según el criterio I de Lamm et al en el sentido Curos-Lomas del Viento</i>	77
Tabla 28. <i>Evaluación de la consistencia según el criterio I de Lamm et al (1999), en el sentido Lomas del Viento-Curos</i>	78
Tabla 29. <i>Evaluación de la consistencia según el criterio II de Lamm et al en el sentido Curos - Lomas del Viento</i>	79
Tabla 30. <i>Evaluación de la consistencia según el criterio II de Lamm et al en el sentido Lomas del Viento-Curos</i>	80
Tabla 31. <i>Datos de los modelos existentes para el cálculo de la V_{85}</i>	86
Tabla 32. <i>Valores numéricos de los parámetros en la regresión múltiple</i>	89
Tabla 33. <i>Valores arrojados en la regresión</i>	91
Tabla 34. <i>Valores de la varianza</i>	91

Tabla 35. <i>Curvas de mayor Accidentalidad según criterio I de Lamm et al sentido Curos- Lomas del Viento</i>	98
Tabla 36. <i>Curvas de mayor accidentalidad según criterio I de Lamm et al, sentido Lomas del Viento- Curos</i>	98

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Perfil de velocidad	27
<i>Figura 2.</i> Puntos a tomar velocidad en el modelo de Gibreel, et al, (2001).	30
<i>Figura 3.</i> Esquema de aplicación del modelo global de Polus, et al. (2004).....	40
<i>Figura 4.</i> Mapa de Colombia, ubicación del tramo	42
<i>Figura 5.</i> Tramo del PR68 al PR78	43
<i>Figura 6.</i> PR 78	43
<i>Figura 7.</i> PR68	44
<i>Figura 8.</i> Accidentalidad del tramo en estudio, Año 2015.....	48
<i>Figura 9.</i> Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2016.....	50
<i>Figura 10.</i> Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2017.....	52
<i>Figura 11.</i> Accidentalidad del tramo en estudio, Año 2018.....	53
<i>Figura 12.</i> Accidentalidad en el tramo en estudio por años.	54
<i>Figura 13.</i> Gráfica de calibración de velocidades.	57
<i>Figura 14.</i> Equipo VIDEO BOX	59
<i>Figura 15.</i> Funcionamiento del Equipo	60
<i>Figura 16.</i> Distribución Normal	62
<i>Figura 17.</i> Distribución Normal	63
<i>Figura 18.</i> Perfil de velocidad individual generado por Racelogic Vbox Tools	64
<i>Figura 19.</i> Gráfica consistencia Criterio I de lamm: Curos- Lomas del Viento.....	78
<i>Figura 20.</i> Gráfica de Consistencia Criterio I de Lamm: Lomas del Viento-Curos.....	79

<i>Figura 21.</i> Gráfica V85 Modelo Mclean	81
<i>Figura 22.</i> Gráfica V85 Modelo Glennon et Al	82
<i>Figura 23.</i> Gráfica V85 Modelo Lamm et al (1999).....	82
<i>Figura 24.</i> Gráfica V85 Modelo Kanellaidis et al (1990)	83
<i>Figura 25.</i> Gráfica V85 Modelo Ottesem.....	83
<i>Figura 26.</i> Gráfica V85 Modelo Castro et al.....	84
<i>Figura 27.</i> Gráfica V85 Modelo Islam	84
<i>Figura 28.</i> Gráfica V85 Modelo Perez-Zuriaga	85
<i>Figura 29.</i> Parámetros para la regresión múltiple.	88
<i>Figura 30.</i> Gráfica de la V_{85} en campo vs V_{85} en modelo.....	94

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO:	Estudio de la Consistencia en el Trazado del Tramo de la Carretera de la Red Vial 45A07 Ubicado entre el PR68 y el PR78 Mediante el Análisis de la Velocidad de Operación
AUTOR(ES):	Luis Carlos Caicedo Barrera
PROGRAMA:	Maestría en Ingeniería Civil
DIRECTOR(A):	Norma Cristina Solarte Vanegas

RESUMEN

Con la realización de este proyecto se analizó la consistencia del trazado geométrico teniendo en cuenta la velocidad de operación en el tramo de la red vial 45A07 utilizando los criterios de la metodología de Lamm, para esto se revisaron los parámetros del trazado geométrico del tramo de la red vial 45A07, se caracterizó la velocidad de operación en el tramo de la red vial entre el PR68 y PR78 y se desarrollaron los perfiles de velocidad de la vía. Las velocidades se tomaron utilizando el equipo Video Vbox Lite de 10 Hz, luego utilizando técnicas estadísticas y software especializado se calculó la V85, el cual es el parámetro que se utiliza para aplicar los criterios de consistencia de Lamm, los cuales están en función de la velocidad de operación y que permitió analizar qué tan seguro es este tramo de la vía.

PALABRAS CLAVE:

Consistencia, velocidad de operación, diseño geométrico, seguridad, perfil de velocidad

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Study of consistency in the tracking of the road track of road network 45A07 located between PR68 and PR78 by Analysis of operating speed

AUTHOR(S): Luis Carlos Caicedo Barrera

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: Norma Cristina Solarte Vanegas

ABSTRACT

With the realization of this project, the consistency of the geometric layout was analyzed taking into account the speed of operation in the section of the road network 45A07 using the criteria of the methodology of Lamm, for this the parameters of the geometric layout of the section of the road were reviewed. Road network 45A07, the speed of operation in the section of the road network between PR68 and PR78 was characterized and the road speed profiles were developed. The speeds were taken using the Video Vbox Lite 10 Hz equipment, then using statistical techniques and specialized software, the V85, was calculated, which is the parameter used to apply the Lamm consistency criteria, which are a function of the speed of operation and that allowed to analyze how safe this section of the road is.

KEYWORDS:

Consistency, speed of operation, geometric design, safety, speed profile

Introducción

La seguridad vial es muy importante a la hora de realizar el trazado de una vía, ya que un mal diseño puede llevar a que se presenten accidentes en la carretera de una forma recurrente, por tal motivo, se hace necesario realizar un análisis de la consistencia de la vía mirando los diferentes métodos existentes, ya que al conocer que trayectos son consistentes o no, se conoce cuales trayectos son menos o más propensos de tener accidentes, porque si la vía es consistente no se realizan cambios bruscos en la velocidad de operación.

Este trabajo permitió analizar la consistencia de un tramo de carretera de la red vial 45A07 ubicado entre el PR68 y el PR78 mediante el análisis de la velocidad de operación, usando para esto los criterios de la metodología de Lamm. Para poder realizar este análisis de la vía se hizo necesario revisar los parámetros del trazado geométrico del tramo en estudio, como, por ejemplo, radio de la curva, longitud de entretangencia, peralte, entre otros. Una vez se realizó esto se caracterizó la velocidad de operación con la ayuda de un equipo Video VBox que se ubica dentro del vehículo que realiza el recorrido en el tramo en estudio, se contó con la participación de 38 vehículos que en total hicieron el mismo número de recorridos en ambos sentidos de la vía, este equipo proporciona datos en tiempo real y con una alta precisión ya que cuenta con un apoyo de 12 satélites que hacen que el margen de error sea muy pequeño.

A partir de estos datos se elaboraron los perfiles de velocidad de los vehículos en la vía y aplicando los criterios I y II de Lamm se analizó la consistencia de la vía.

Finalmente a partir de los datos de la velocidad de operación V_{85} y de algunos parámetros geométricos se hizo un análisis de regresión múltiple para encontrar un modelo matemático.

1. Planteamiento del Problema

Las carreteras en Colombia se diseñan geoméricamente teniendo como base la velocidad de diseño, pero dicha velocidad no es conocida por el usuario, ni se encuentra debidamente señalizada, esto conlleva a que en la vía se presenten gran cantidad de accidentes de tránsito, los cuales se presentan en la mayoría de los casos por el exceso de velocidad (Restrepo, 2012). Nuestro país se encuentra dentro de los 10 países con mayor accidentalidad en las vías y por ende con una alta tasa de mortalidad en las carreteras colombianas.

Aproximadamente el 30% de estos accidentes de tránsito se presentan por la baja consistencia que existe en el diseño. Se dice que una carretera es consistente cuando el trazado geométrico responde a lo que los conductores esperan encontrar cuando están manejando en carretera; si esto es así, los conductores podrán realizar un recorrido cómodo, ágil, donde la rapidez del vehículo tenderá a ser constante, disminuyendo así grandemente las posibilidades de accidentalidad, en caso contrario, los conductores se verán abocados a introducir cambios bruscos en la dirección de la velocidad y también en la rapidez, lo cual conlleva a que el conductor pueda cometer imprudencias o verse sorprendido por la vía al presentarse trazados no esperados como por ejemplo radios de curvaturas muy pequeños que pueden ocasionar un accidente. Con este proyecto se analizó la consistencia que existe en el trazado geométrico del tramo de vía en estudio, teniendo en cuenta la velocidad que lleva el conductor, la cual es conocida como la "velocidad de operación", aplicando la metodología de Lamm, para así observar en que sitios de la carretera se tendrá mayor posibilidad que se presenten accidentes.

1.1 Objetivos de la Investigación

Este proyecto de grado tiene como objetivo principal analizar la consistencia del trazado geométrico en el tramo de la red vial 45A07 utilizando los criterios de la metodología de Lamm.

Para cumplir con dicho objetivo se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Revisar los parámetros del trazado geométrico del tramo de la red vial 45A07, y de los datos relacionados con la accidentalidad.
- Caracterizar la velocidad de operación del tramo de la red vial 45A07 entre PR68 y PR78.
- Desarrollar los perfiles de velocidad de la vía.
- Aplicar los criterios de Lamm para el análisis de consistencia en el trazado geométrico teniendo en cuenta la velocidad de operación.

1.2 Etapas de la Investigación

Para la realización de este proyecto se propusieron las siguientes etapas.

- Revisión, análisis bibliográfico y estado del arte.
- Análisis de los parámetros geométricos de la vía en estudio.
- Toma de datos de velocidad en campo.
- Análisis y estudio de los modelos existentes para el cálculo de la velocidad de operación V85.
- Modelado de los perfiles de velocidad.
- Evaluación de la consistencia de la vía.
- Análisis de los resultados, teniendo en cuenta la accidentalidad en el tramo de vía.
- Elaboración de informes parciales y Elaboración informe final y sustentación.

2. Marco Teórico

2.1 Consistencia.

Una carretera es una vía de comunicación de uso público, diseñada y construida para la circulación principalmente de vehículos. Para construirla se debe tener en cuenta un diseño geométrico, el cual responde a un estudio de viabilidad por donde debe pasar la vía. Cuando un automóvil recorre la vía, lo hace a una velocidad que debe responder al trazado de la carretera, este transitar debe ser cómodo, sin sobresaltos, sin cambios bruscos que hagan que el solo de hecho de manejar sea estresante y peligroso, es por esto, que un mal diseño de la vía conlleva a que la vía no sea segura (Treat, y otros, 1979); (Castro M. , Sánchez, Sánchez, & Iglesias, 2009). Por consiguiente, se puede decir que la consistencia es la concordancia que existe entre el trazado o características geométricas y aquellas características que el conductor espera encontrar cuando transita a una determinada velocidad (Garcia, Camacho, & Pérez, 2011). Existen varios criterios para evaluar la consistencia, los cuales se verán a continuación:

2.2 Criterios para Evaluar la Consistencia

La consistencia es un objeto de estudio de muchos investigadores (Lamm R. , Choueiri, Hayward, & Paluri, 1988); (Castro, Iglesias, Rodriguez-Solano, & Sanchez, 2008) y existen muchos criterios para evaluarla

2.2.1 Criterio basado en la estabilidad del vehículo. En la estabilidad de un vehículo influyen muchos factores, como, por ejemplo, el centro de masa, la altura del vehículo, la distancia entre llantas y el ancho de ellas. En el caso del centro de masa, si este se encuentra elevado, el automotor puede volcarse en una curva muy inclinada debido a la fuerza gravitacional que actúa sobre él, pero en esta ocasión se analiza la estabilidad del vehículo debido a las fuerzas de rozamiento transversales presentes entre las llantas y el pavimento cuando da una curva. Si esta fuerza de rozamiento es insuficiente el vehículo puede salirse de la curva, por lo tanto, esto podría considerarse como una inconsistencia en el trazado de la vía. La diferencia que hay entre la fuerza de rozamiento transversal y la fuerza de rozamiento necesaria para no salirse de la curva se utiliza para analizar la estabilidad del vehículo (Ng & Sayed, 2004), se sabe que la fuerza de rozamiento es proporcional al peso del vehículo y la constante de proporcionalidad es el coeficiente de fricción entre las superficies, el peso se elimina de la ecuación, se puede decir entonces que la estabilidad del vehículo dependerá de la diferencia entre el rozamiento transversal y el rozamiento necesario para no salirse de la curva.

$$\Delta F_R = F_R - F_{RD}$$

Donde

ΔF_R es la estabilidad del vehículo

F_R es el rozamiento transversal

F_{RD} es el rozamiento demandado por el vehículo

Lamm, Psarianos, y Mailaender (1999), desarrollaron un modelo para la evaluación de la consistencia y que es bastante utilizado:

$$F_R = 0,22 - 1,79 \cdot 10^{-3} V_d + 0,56 \cdot 10^{-5} V_d^2$$

$$F_{RD} = \frac{V_{85}^2}{127 R} - e$$

Donde:

V_d Es la velocidad de diseño (Km/h)

V_{85} Es la velocidad que solo es sobrepasada por el 15% de los vehículos (Km/h)

R Es el radio de curvatura (m)

e Es el peralte

Este modelo propone los niveles de consistencia en función de ΔF_R dados en la Tabla 1

Tabla 1.

Niveles de consistencia basados en la estabilidad del vehículo

Evaluación	Criterio III
Buena	$F_R - F_{RD} \leq 0,01$
Aceptable	$0,01 > F_R - F_{RD} \geq -0,04$
pobre	$F_R - F_{RD} \leq -0,04$

Fuente: Highway design and traffic safety engineering handbook. Adaptado de Lamm; Psarianos, B. y Mailaender, T., (1999). McGraw-Hill Companies, Inc., New York, N.Y.

2.2.2 Criterio basado en índices de trazado. Estos criterios están basados en las características geométricas de la carretera y muestran los cambios bruscos que se presentan en ella. Según Pérez, Camacho, y García (2011) y Castro, Pardillo-Mayora, y Sánchez (2005), algunos de los índices más usados para evaluar la consistencia son:

- Tasa de Cambio de Curvatura (CCR): Es la suma de los ángulos de deflexión entre la longitud total del tramo.
- Grado de curvatura (DC): Es la relación entre la longitud de la curva y su radio.

- Radio medio (AvgR): Es el radio de curvatura medio del segmento.
- Recta media (AvgT): Es aquel que se mide como la longitud de las rectas entre el número de rectas.
- Radio máximo (MaxR) entre radio mínimo (MinR): Es la relación entre el máximo y el mínimo radio dentro de un segmento; es decir (MaxR/MinR).

2.2.3 Criterio basado en la Carga de trabajo del Conductor. Cuando una persona va conduciendo está realizando una actividad física y una mental que pueden llevarlo a un desgaste físico o emocional, este desgaste está relacionado con la calidad de la vía por donde va conduciendo, si la vía no es consistente el desgaste será mayor y puede llevarlo a producir una maniobra equivocada. Messer en 1980, propuso que existe una relación entre la carga mental mientras se está manejando con la consistencia, así mismo, Lamm, et al, (1999), y De Waard en el 2002, sostienen que la carga mental está relacionada con el grado de atención, existiendo un rango óptimo de carga mental en el que se maximiza la calidad de la tarea de la conducción.

Por estas razones, este criterio trata de medir la carga mental inducida por diferentes condiciones existentes durante la conducción.

Existe diferentes métodos para conocer la carga de trabajo del conductor sobre un tramo de la vía (Pérez, Camacho, & García, 2011). Estos se basan en el análisis y medición de diversas variables físicas y mentales, en la distancia de visibilidad del conductor.

La medición de variables físicas y mentales consiste en evaluar cómo reacciona el conductor físicamente frente a la carga de trabajo (Heger, 1995); (Cafiso, Di Graziano, La Cava, Lamm, & Heger, 2004), como por ejemplo la frecuencia de pestañeo, ritmo cardiaco entre otras.

Un lento pestañeo puede significar una baja carga de trabajo, mientras que un elevado ritmo cardiaco puede demostrar una carga de trabajo alta.

En lo referente a la distancia de visibilidad, si la visibilidad es limitada, la carga de trabajo de los conductores se incrementa porque necesitan actualizar la información relativa a la carretera con mayor frecuencia y procesarla en menor tiempo (Ng & Sayed, 2004).

Sobre la distancia de visibilidad hay muy pocas investigaciones (Altamira, Marcet, Graffigna, & Gómez, 2010), sin embargo, las relativas a la demanda visual son más abundantes. La demanda visual es la cantidad de información visual que un conductor necesita para mantener una adecuada trayectoria en la carretera (Wooldridge, Fitzpatrick, Koppa, & Bauer, 2000). Para estimarla, Wooldridge, et al, (2000), propusieron dos modelos, en función de que el conductor estuviera o no familiarizado con la carretera:

$$VD_{LU} = 0.1793 + \frac{43.0}{R}$$
$$VD_{LF} = 0.198 + \frac{29.2}{R}$$

Donde:

VD_{LU} Es la demanda visual para los conductores no familiarizados con la carretera

VD_{LF} Es la demanda visual para los conductores familiarizados con la carretera

R Es el radio de la curva horizontal.

Krammes, Rao, y Oh, (1995), utilizaron una técnica consistente en que los conductores cierran los ojos y los vuelven a abrir sólo cuando piensan que es necesario extraer información de la carretera para guiar el vehículo adecuadamente. La cantidad de tiempo que los conductores

tienen los ojos abiertos representó la carga de trabajo mental necesaria para la conducción. De este modo obtuvieron la siguiente relación:

$$WL = 0.193 + 0.016DC \quad R^2 = 0.90$$

Donde:

WL (WorkLoad) Es la carga de trabajo media en la curva en %

DC (Degree of Curvatura) Es el grado de curvatura de la curva horizontal.

Conceptualmente, la carga de trabajo podría identificar mejor las inconsistencias que la velocidad de operación ya que la carga de trabajo se mide directamente sobre el conductor mientras que la velocidad de operación es sólo una variable derivada de la manera de conducir. Sin embargo, la carga de trabajo se utiliza mucho menos que la velocidad de operación porque presenta una gran debilidad que es la dificultad de ser medida debido a su naturaleza subjetiva (Krammes & Glascock, 1992).

2.2.4 Criterio basado en la Velocidad DE operación. Se puede decir que la velocidad de operación es la que tiene realmente un vehículo al transitar por una carretera, pero una definición más rigurosa la da la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en el 2004:

“La velocidad de operación es la velocidad desarrollada por los conductores en condiciones de flujo libre”.

El percentil 85 de la distribución de velocidades, V_{85} , es la medida más utilizada para la velocidad de operación. Por tanto, la V_{85} es la velocidad que solo es superada por el 15% de los vehículos.

Muchos autores afirman que la velocidad de operación es la forma más general para medir la consistencia de una vía, puesto que es fácil de medir y de alguna manera está también intrínseco cómo se comporta el conductor en la carretera (Ng & Sayed, 2004); (Camacho-Torregrosa, Pérez-Zuriaga, Campoy-Ungría, & García-García, 2012); (Gibreel, Easa, & El-Dimeery, 2001).

Existe una relación directa entre los accidentes en carretera y la consistencia en ellas, esto lo corroboran muchas investigaciones realizadas en diversas partes del mundo, por ejemplo, Fitzpatrick y otros, (2000), hicieron un estudio en carreteras americanas, mostrando como la reducción brusca de velocidad puede ocasionar accidentes. Para esto, analizaron los accidentes ocurridos en 5.287 curvas en un período de tres años, aplicando distribuciones de Poisson para ver la relación de los accidentes con el volumen de tráfico, con la longitud de los elementos y con las reducciones de velocidad. Además analizaron la relación entre la siniestralidad y diversos índices del trazado pero demostraron que los accidentes estaban más relacionados con la reducción de velocidad que con los índices de trazado.

En otra investigación Ng y Sayed (2004),] analizaron 319 curvas y 511 rectas de carreteras convencionales en Canadá. Utilizaron distribuciones binomiales negativas para ver la relación entre los accidentes, el volumen de tráfico, la longitud de los elementos de estudio y las reducciones de velocidad. Encontraron una relación positiva entre la frecuencia de accidentes y las variables analizadas. Camacho-Torregrosa, et al, (2012), analizaron en 33 segmentos de carreteras españolas, la relación entre la siniestralidad y distintas medidas obtenidas a partir del perfil de velocidad, tales como, el promedio de los decrementos de velocidad y la desviación típica

de los decrementos de velocidad, encontrando que existía una gran relación entre la siniestralidad y la velocidad de operación.

Otros estudios revelan que muchos problemas de seguridad se deben a una inapropiada velocidad, no la confundamos con exceso de velocidad (Elvik, 2013); (Hallmark, Smadi, & Hawkins, 2013). Una inapropiada velocidad sería por ejemplo, cuando se presenta un cambio brusco en la vía, es decir, suponga que después de una recta prolongada que permite alcanzar una magnitud grande de velocidad se presenta una curva cerrada, es decir, aquella con un radio de curvatura muy pequeño, lo cual con lleva a que el conductor deba reducir bruscamente esta rapidez y por ende se puede presentar un accidente. Según Findley, et al, (2012), es más peligroso una curva aislada que pueda sorprender al conductor que una zona de curvas en la que el conductor suele viajar con más precaución. Ng y Sayed (2004), concluyeron que la velocidad de operación es la medida más común y simple de la consistencia y es la que mejor indica las inconsistencias porque cuando el diseño de la carretera quebranta las expectativas del conductor, éste reduce la velocidad del vehículo.

Vemos entonces que una inadecuada velocidad puede ocasionar siniestros y/o problemas de seguridad, por consiguiente, es un criterio bastante utilizado para medir la consistencia de una vía, además que es muy fácil de calcular o de medir.

2.3 Definición de Velocidad

La velocidad físicamente es el cambio de la posición respecto al tiempo, pero en este caso se necesita definir algunos conceptos más específicos de algunas velocidades que son aplicados en este trabajo.

2.3.1 Velocidad de Diseño (V_{TRH}). Según el Manual de Diseño Geométrico para Carreteras (GEOM), la velocidad de diseño o velocidad de proyecto de un tramo de carretera se define como *“la velocidad guía o de referencia que permite definir las características geométricas mínimas de todos los elementos del trazado, en condiciones de comodidad y seguridad”*. Esto significa que esta velocidad se necesita como una referencia mínima para el diseño de una carretera. También el GEOM la define como *“la máxima velocidad segura y cómoda que puede ser mantenida en una sección determinada de una vía, cuando las condiciones son tan favorables, que las características geométricas del diseño de la vía predominan”* (Colombia, Ministerio de Transporte; Instituto Nacional de Vías, 2008).

2.3.2 Velocidad Específica de un Elemento (V_e). Si se considera un elemento del trazado en forma aislada, se puede definir la velocidad específica como la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de ese elemento de trazado, teniendo en cuenta las condiciones de comodidad y seguridad, cuando encontrándose el pavimento húmedo y los neumáticos en buen estado, las condiciones meteorológicas, del tráfico y legales son tales que no imponen limitaciones a la velocidad (Colombia, Ministerio de Transporte; Instituto Nacional de Vías, 2008)

Esta velocidad es muy importante porque a través de esta se determinan los radios mínimos, así como el peralte de las curvas y la visibilidad necesaria.

2.3.3 Velocidad de Operación (V_{85}). Según la Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO 2004): La velocidad de operación es la velocidad desarrollada por los conductores en condiciones de flujo libre. El percentil 85 de la distribución de velocidades, V_{85} , es la medida más utilizada para la velocidad de operación. Por tanto, la V_{85} es la velocidad que solo es superada por el 15% de los vehículos (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, 2004)

2.4 Modelos para la Estimación de la Velocidad de Operación

Anteriormente se observó que la velocidad V_{85} o la velocidad de operación es muy importante para analizar la consistencia de una vía, esta puede obtenerse en medidas directas de campo o estimarse a partir de un perfil de velocidad.

2.4.1 Cálculo de la Velocidad de Operación Mediante perfiles de Velocidad. Las medidas en campo son bastante útiles para calcular la velocidad de operación V_{85} , pero también puede estimarse esta velocidad a través de un perfil de velocidad. El perfil de velocidad representa la velocidad de operación a lo largo de la carretera (ver figura 1).

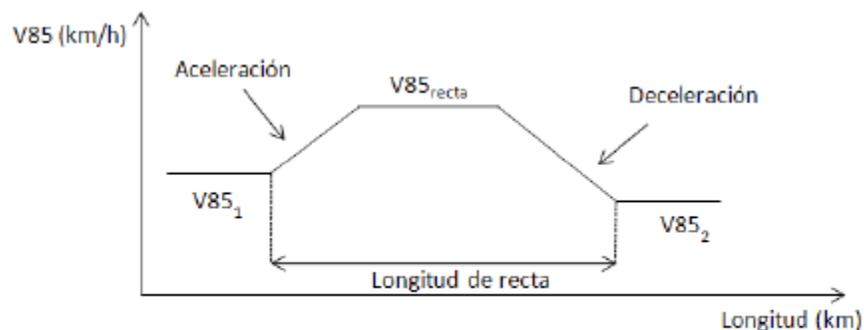


Figura 1. Perfil de velocidad

Fuente: Elaboración Propia

Donde, V_{85_1} es el percentil 85 de velocidad en la curva anterior; V_{85_2} es el percentil 85 de velocidad en la curva posterior; V_{85} recta es la máxima velocidad de operación en la recta.

Para construir el perfil de velocidad es necesario:

- Conocer la geometría de la carretera, es decir, las alineaciones (curvas, rectas y espirales)
- Dividir en tramos la carretera estableciendo entre qué puntos se va a calcular el perfil de velocidad.

- Conocer la velocidad teórica en cada elemento del trazado, así como la tasa de aceleración o desaceleración entre los distintos elementos del trazado.

Existen diversos modelos para calcular esta velocidad dependiendo de la topografía, condiciones climatológicas y comportamiento del conductor.

Algunos modelos para calcular las velocidades de operación son:

2.4.2 Cálculo de la Velocidad de Operación en Curvas. Cada país se comporta en costumbres y moneda muy diferente a otro, y eso no exceptúa la velocidad de operación, la forma de conducir en cada país también es diferente, esto nos lleva a decir que no hay un modelo mundialmente aceptado, sino que presentan similitudes y diferencias según sea el país y según las variables que analicen, no es lo mismo conducir bajo temporada invernal o bajo la nieve, que en época de verano o en climas con altas temperaturas. En los últimos años se han desarrollado diversos modelos para calcular la velocidad de operación en curvas. Por lo general se propone calcular la velocidad de operación usando las características geométricas de la alineación y a su vez se usa el radio de curvatura (R) como la única variable o el grado de curvatura (DC), ya que el uso de estas variables se traducen en ecuaciones muy sencillas y relacionadas entre sí (Taragin & Leisch, 1954); (Misaghi

& Hassan, 2005). Todos estos modelos presentaron un grado de ajuste alto con valores que oscilaron entre un valor mínimo de 0,631 y un máximo de 0,98.

Otros modelos como los de Gambard y Louah (1986), Lamm, et al (1995), Pérez- Zuriaga, et al (2010), usan la Tasa de Cambio de Curvatura CCR, definida anteriormente. Los grados de ajuste obtenidos con esta variable también son altos, variando desde un mínimo de 0,63 a un máximo de 0,82.

Otros investigadores: Castro, Sánchez, Sánchez, & Iglesias (2009); Krammes, Rao, & Oh, (1995), utilizan la longitud de la curva y el DC o el radio de la curva con grados de ajuste variando entre 0,81 y 0,82.

Otros prefieren analizar otras variables transversales a la vía como el ancho de calzada, ancho de carriles, como por ejemplo Lamm et al (1987); Dell'Acqua y Russo (2010), o la velocidad en la recta próxima realizado por McLean (1978); MacFadden y Elefteriadou, (1997); Cardoso y otros (1998); MacFadden y Elefteriadou (2000) y Abdul- Mawjoud y Sofia (2008). Todos presentan un alto grado de correlación con valores de R² que van desde 0,712 a 0,90.

Lo común que arrojan casi todos los modelos es que la magnitud de la velocidad de operación permanece constante a lo largo de toda la curva. Además, tanto la velocidad que se utiliza para calibrar el modelo como la velocidad que estima dicho modelo, suele ser la del punto medio de la curva, considerando que es en este punto donde se da la velocidad mínima.

Otros modelos no están de acuerdo con este concepto y suponen que la velocidad de operación cambia en la curva y por esto proponen modelos para medir la velocidad en la curva al ingresar, en su punto medio y al finalizar la curva, Islam y Seneviratne (1994), en U.S. aplicaron esta idea y encontraron grados de correlación muy altos, 0,99, 0,98 y 0,90.

Gibreel, Easa y El-Dimeery (2001), en Canadá, propusieron 5 modelos de velocidad en curvas para cinco puntos de la misma, el punto 1 situado en la recta precedente, entre 60 y 80 metros antes del inicio de la curva de transición, el punto 2 situado en el contacto entre la espiral inicial y la curva circular, el punto 3 situado en el punto medio de la curva circular, el punto 4 situado en el encuentro entre la espiral final y la curva y el punto 5 situado en la recta de salida, a 60 y 80 metros del punto donde finaliza la curva. De este modo consiguieron desarrollar un perfil de velocidad casi continuo de la velocidad de operación en las curvas. Los coeficientes de correlación que obtuvieron variaron entre 0,79 y 0,98. En la figura puede verse los puntos a los cuales hacen referencia los autores:

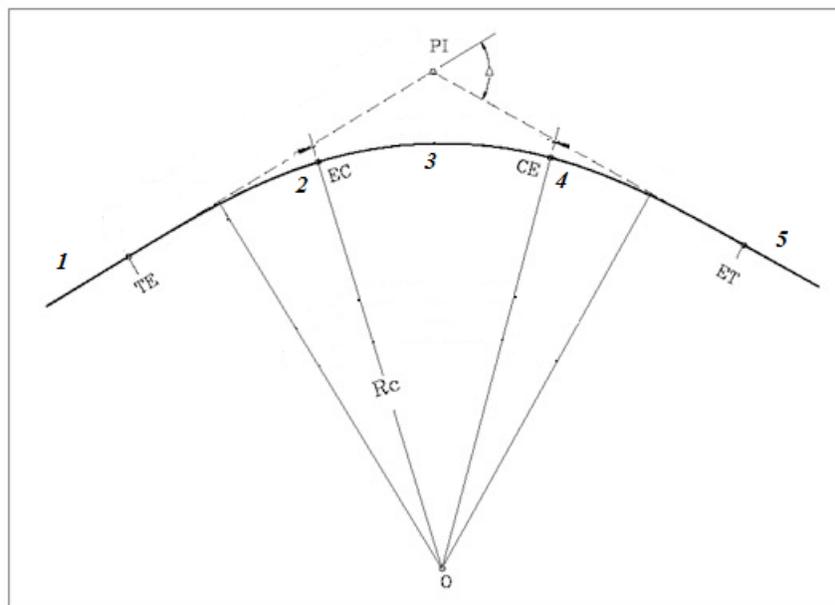


Figura 2. Puntos a tomar velocidad en el modelo de Gibreel, et al, (2001).

Fuente: Elaboración Propia

Nie y Hassan (2007), en Ontario, Canadá, no se centran únicamente en el percentil 85, sino que calibran también los percentiles 50, 85 y 95 de la velocidad de operación en el punto medio de la curva. De este modo, sin llegar a tener perfiles de velocidad continuos, se consigue tener un

mejor conocimiento del comportamiento del conductor en la curva. Obtuvieron por tanto tres modelos, uno para cada uno de los percentiles de velocidad mencionados. (Pérez Z., García, Torregrosa, y D'Attoma, (2010), en España, obtuvieron perfiles continuos de velocidad. Con los datos recogidos crearon un modelo que estimaba la velocidad de operación mínima en la curva (no la del punto medio). Utilizaron los datos obtenidos en 43 curvas, y desarrollaron tres modelos para la estimación de la velocidad de operación, uno basado en el CCR para el que se obtuvo una correlación de 0,79, otro basado en el radio para curvas con radios superiores a 400 m, para el que la correlación obtenida fue del 0,76 y otro basado en el radio para curvas con radios inferiores a 400 m con una correlación de 0,84.

No obstante, todos los modelos mencionados anteriormente solo tienen en cuenta el trazado en planta. Sólo hasta el año 2000 aparece un modelo para medir la velocidad de operación en trazado en planta y en perfil. Fitzpatrick, y otros (2000), en U.S. calculan la velocidad de operación de la curva en función de la pendiente del terreno y de la concavidad o convexidad del trazado. Los coeficientes de correlación obtenidos varían desde 0,53 a 0,92. Gibreel, et al (2001), además de considerar la velocidad en cinco puntos diferentes de la curva, desarrollaron modelos independientes para acuerdos cóncavos y convexos. Estudios posteriores en Italia y en Iraq (Bevilacqua, Di Mino, & Nigrelli, 2004); (Abdul-Mawjoud & Sofia, 2008), también tienen en cuenta el trazado en perfil.

2.4.3 Cálculo de la Velocidad de Operación en Rectas. Cuando un conductor va en una recta es más difícil predecir su comportamiento porque no hay variable más relevante que otra, como por ejemplo en las curvas, donde aparece el radio de curvatura, como un factor determinante; por consiguiente no se tienen abundancia de modelos para este cálculo y no presentan gran

concordancia entre ellos La longitud de la recta es uno de los factores que determina con que velocidad se ingresa a una curva o que tanta velocidad se debe reducir.

Pérez-Zuriaga y otros (2011), habla de dos tipos de recta:

- Las rectas independientes Son aquellas cuya longitud es suficiente como para permitir al vehículo alcanzar la velocidad máxima deseada en la recta. La longitud mínima de éstas suele estimarse en 200 m.
- Las rectas no independientes. Son aquellas cuya longitud no es suficiente para poder permitir alcanzar la velocidad deseada.

Krammes, et al (1995), en U.S., proponen una velocidad de 97,9 km/h, que corresponde a la velocidad deseada, definida como la velocidad a la que los conductores eligen viajar en condiciones de flujo libre cuando no se ven limitados por las características de la alineación. Fitzpatrick y otros (2000), en U.S., apoyan este valor y también demuestran que se pueden dar valores más altos de velocidad en rectas. Basándose en el estudio de 176 rectas en carreteras convencionales, el percentil 85 estaba entre 93 y 104 km/h, por lo que Fitzpatrick y otros (2000), consideraron que 100 km/h era un buen valor a adoptar para la velocidad deseada en rectas independientes. Hassan, et al (2000), en Canadá, recomendaron una velocidad de 102,0 km/h, porque establecieron que este era el valor de la velocidad deseada en las rectas. Misagui y Hassan (2005), también en Canadá, propusieron 103,0 km/h para rectas independientes (longitudes de recta superiores a 200 m) y 95,8 km/h para rectas no independientes (longitudes de recta inferiores a 200 m).

Otros autores han considerado en sus estudios, un valor de velocidad en rectas independientes constante, obtenido sustituyendo los valores de una recta (radio infinito, grado de curvatura cero) en los modelos de velocidad en curvas. De este modo Lamm y Choueiri (1987), en U.S. proponen una velocidad de 94,7 km/h en rectas independientes. Este valor fue obtenido considerando radio infinito en sus modelos de velocidad en curvas. Hassan, et al. (2000) y Ng y Sayed (2004), en Canadá, consideraron un valor de 95,7 km/h resultado de tomar un valor de 0 en el modelo de velocidad en curvas de Morrall y Talarico (1994). Richl y Sayed (2005), consideraron un valor de 98,18 km/h para la velocidad de operación en rectas independientes. Este valor fue obtenido utilizando los tres modelos propuestos por Islam y Seneviratne (1994), en Utah (U.S.) para calcular la velocidad en curvas (uno para la velocidad al principio, al final y en mitad de la curva). Consideraron en las tres ecuaciones el grado de curvatura cero y obtuvieron una velocidad media de 98,18 km/h como media de las tres ecuaciones. Otros autores han empleado más variables para estimar la velocidad en las rectas: Andueza (2000), en Venezuela y Crisman, et al. (2005), en Italia desarrollaron modelos de velocidad en rectas que dependían de la longitud de la recta y del radio de la curva anterior. Polus, Fitzpatrick, y Fambro (2000), en U.S. desarrollaron 4 modelos para predecir la velocidad en rectas. Las carreteras se dividieron en cuatro grupos en función de los radios de las curvas anterior y posterior y de la longitud de la recta. Los modelos introdujeron una variable independiente, que denominaron Geometric Measure (GM) que toma diferentes valores en función de la longitud de la recta existente entre las curvas. Para dicha longitud de recta establecieron un umbral t . Las velocidades de operación que estimaron para cada uno de los grupos fueron:

Grupo 1. El radio de la curva anterior y posterior a la recta es menor o igual a 250 m y la longitud de la recta entre curvas es inferior a 150 m. Para este grupo, la velocidad de operación que estimaron fue:

$$V_{85} = 101.11 - \frac{3420}{GM_s} \quad R^2 = 0.553$$

V_{85} Es la velocidad de operación en Km/h

GM_s Es la variable independiente (Geometric Measure) para rectas cortas, en m, dada por:

$$GM_s = \frac{R_1 + R_2}{2}, \quad \text{si } L_T < t$$

R_1 Es el radio de curvatura anterior en m

R_2 Es el radio de curvatura posterior en m

L_T Es la longitud de la recta entre curvas en m

$t = 215$ m, umbral establecido para la longitud de la recta entre curvas.

Grupo 2. El radio de la curva anterior y posterior a la recta es menor o igual a 250 m y la longitud de la recta entre curvas es mayor o igual que 150 m y menor que 1000 m. Para este grupo, sugirieron dos modelos aunque destacan que el segundo proporciona mejor predicción que el primero:

$$V_{85} = 98.405 - \frac{3184}{GM_L} \quad R^2 = 0.684$$

$$V_{85} = 105 - \frac{28.107}{e^{0.00108GM_L}} \quad R^2 = 0.742$$

Donde

GM_L Es la variable independiente para rectas largas, en m, dada por:

$$GM_L = \frac{L_T (R_1 * R_2)^{1/2}}{100} \quad \text{si } L_T \geq t$$

2.4.4 Estimación de los Cambios de la Velocidad de Operación en la transición Recta-Curva. En la seguridad en carretera juega un papel importante los cambios que sufre la velocidad en la transición curva-recta, donde se hace importante entonces conocer la reducción de la velocidad entre dos alineaciones, en donde la segunda alineación es menor. La variación de la velocidad de operación entre dos alineaciones mediante un percentil.

A partir de unos estudios (Crisman, Marchionna, Perco, & Roberti, 2005), se llegó a la conclusión de que el percentil 85 de la máxima reducción de la velocidad es sustancialmente mayor que la resta de las velocidades de percentil 85.

Las variables que se usan para el estudio del diferencial de la velocidad de operación entre elementos consecutivos son:

- $\Delta 85V$, indica diferencial de velocidad que no es superado por el 85% de los vehículos en condiciones de flujo libre. Se calcula como el percentil 85 de la distribución de Δv_i , donde Δv_i es el decremento desde la velocidad de la recta precedente a la curva para el vehículo (Misaghi & Hassan, 2005).

- ΔV_{85} representa el incremento de las velocidades de operación de percentil 85. Se obtiene por sustracción directa, partiendo de modelos discretos de estimación de la velocidad de operación o de un modelo continuo.

- 85MSR esta variable representa el percentil 85 de las máximas reducciones de velocidad individual a lo largo de una sección formada por los últimos 200 metros de la recta de aproximación y el punto medio de la curva. La reducción máxima de velocidad es tomada como la diferencia entre la máxima velocidad en la recta de aproximación y la mínima velocidad en la curva por un conductor individual (McFadden & Elefteriadou, 1997).

- 85MSI Esta variable representa el diferencial de velocidad de operación calculado como el percentil 85 de los máximos incrementos de velocidad. Cada incremento de velocidad en la distribución se toma como la diferencia entre la máxima velocidad en la recta de salida y la mínima velocidad en la curva para cada conductor individual (Fitzpatrick, y otros, 2000). Existen modelos que permiten estimar el valor de uno de los parámetros en función de alguno de los otros tres (3) parámetros:

Tabla 2.

Relación entre parámetros referentes a diferenciales de velocidad

Año	Autor	Ecuación	R2	Observaciones
2005	Misaghi y Hassan (2005)	$\Delta 85V = 0.97 * \Delta V85 + 7.55$	0.72	
2008	Bella	$85MSR = 6.35 + 1.08 * \Delta 85V$	0.92	
2011	Castro et al.	$\Delta 85V = 4.497 + 0.704 * \Delta V85$	0.74	

Fuente: Elaboración Propia

También se encuentran modelos para estimar los valores de estos parámetros en función de características geométricas del trazado:

Tabla 3.

Modelos para la estimación de parámetros referentes a diferenciales de velocidad

Año	Autor	Ecuación	R2	Observaciones
2007	Nie y Hassan (2007)	$\Delta V_{85} = -5.326 + 0.073 * CCR$	0.57	
2007	Nie y Hassan (2007)	$\Delta 85V = -4.540 + 0.088 * CCR$	0.75	
2007	Nie y Hassan (2007)	$85MSR = -0.658 + 0.107 * CCR$	0.76	

Fuente: Elaboración Propia

Igualmente se presentó un modelo que permite estimar el percentil 85 de los incrementos de velocidad en función del Radio de la curva horizontal:

$$\Delta 85V = 10.005 + \frac{1299.733}{R}$$

2.5 Modelos para Medir la Consistencia Basados en la Velocidad de Operación

La seguridad vial es un indicativo de la consistencia de la vía, si una vía es consistente quiere decir que existe un alto grado de relación entre los diseños geométricos de la vía y la seguridad y el confort al manejar por esa vía. Para garantizar el nivel de seguridad asociado al diseño geométrico de una vía se debe realizar un análisis de la consistencia, especialmente en aquellas carreteras de calzada sencilla en ambas direcciones, y para esto, una de las variables importantes o tal vez la más importante, es la velocidad de operación, ya que a través de esta se pueden identificar problemas locales y realizar estudios en todo un tramo.

En la práctica para medir la consistencia basada en la velocidad de operación existen dos métodos, uno que evalúa la consistencia en un punto localizado del trayecto de la vía y el otro que muestra la consistencia en todo el tramo de la vía.

2.5.1 Modelos de Evaluación Local de la Consistencia. Estos modelos evalúan la consistencia de cada elemento geométrico de una manera aislada o en otras palabras, evalúan la consistencia de un determinado elemento del trayecto de la vía (García, Camacho, & Pérez, 2011).

Dentro de estos métodos el más conocido es el desarrollado por Lamm, et al. (1999), donde se establecieron tres criterios de consistencia, dos de los cuales están en función de la velocidad de operación y el tercero en función del rozamiento transversal, este tercer criterio puede verse en la tabla 1. Los otros dos criterios se muestran en la tabla 2.

Criterio I: Compara la velocidad de diseño y la velocidad de operación.

Criterio II: Compara la velocidad de operación entre elementos sucesivos del trazado.

Criterio III: Compara el rozamiento transversal movilizado y el demandado.

De los tres criterios los más utilizados son el I y el II, en los cuales se establecieron tres umbrales, estos umbrales fueron establecidos basándose en un análisis de siniestralidad.

Tabla 4.

Niveles de consistencia según criterios basados en la velocidad de operación

Evaluación	Criterio I	Criterio II
Buena	$ V_{85} - V_d \leq 10$	$ V_{85i} - V_{85\ i+1} \leq 10$
Aceptable	$10 < V_{85} - V_d \leq 20$	$10 < V_{85i} - V_{85\ i+1} \leq 10$
Pobre	$ V_{85} - V_d > 20$	$ V_{85i} - V_{85\ i+1} > 20$

Fuente: Highway design and traffic safety engineering handbook. Adaptado de Lamm, R., Psarianos, B. y Mailaender, T., (1999). McGraw-Hill Companies, Inc., New York, N.Y.

Al aplicar el modelo se pueden que tres tipos de evaluación: Buena, Aceptable y Pobre. Si la evaluación es Buena, esto significa que al trazado no se necesita realizarle ningún cambio, ya que cumple con las expectativas de los conductores. Si la evaluación es Aceptable indica que está relativamente bien o que necesita algunos cambios y estos cambios estarán sujetos al umbral del cual se acerque, si al límite inferior o superior, lo que conlleva a revisar el grado de inconsistencia que el diseñador esté dispuesto a aceptar. Si la evaluación es Pobre, esto significa que la vía no es consistente y podrá ocasionar una alta accidentalidad y por lo tanto atentará contra la vida de los conductores, por lo cual se hace necesario rediseñar la vía.

2.5.2 Modelos de Evaluación Global de la Consistencia. Los modelos de evaluación global analizan todo el tramo en estudio, en el cual se incluyen todas las curvas y/o rectas y como resultado muestran la consistencia para todo el tramo analizado.

Polus y Mattar-Habib (2004), consideraron de forma completa el perfil de velocidad de operación de un tramo de carretera, reflejando en cierta medida su dispersión. Se entiende que la dispersión en la velocidad de operación está ligada con los cambios en la carga cognitiva del

conductor que supone la geometría de la vía, y que un elevado número de cambios en dicha carga cognitiva está asociado con una mayor siniestralidad. Cuanta mayor variación haya en las velocidades de operación a lo largo del tramo, más pendiente tendrá que estar el conductor para adaptar continua y adecuadamente su evolución. En este modelo, además, se calibró un indicador continuo de consistencia, en lugar de utilizar umbrales. Dicho indicador se relacionó con la siniestralidad, por lo que empleando estos métodos es posible estimar el número de accidentes con víctimas del diseño geométrico analizado. Pese a estas dos últimas ventajas, los modelos globales son menos utilizados que los locales debido a la dificultad de estimar el perfil continuo de velocidad. Además, los modelos locales permiten identificar la zona concreta donde se produce el problema de inconsistencia y así tener más claro donde mejorar el diseño. De todas formas, el uso de ambos tipos de modelos no es excluyente. Polus y Mattar-Habib (2004), desarrollaron dos nuevas medidas de consistencia. La primera se basa en el área por unidad de longitud (R_a), encerrada entre el perfil de velocidad de operación y la línea que representa el promedio de la velocidad de operación a lo largo del tramo. La segunda medida es la desviación estándar (σ) de la velocidad de operación a lo largo del tramo completo en estudio. En la Figura 3 se esquematizan ambos parámetros y en la Tabla 3 están los umbrales correspondientes.

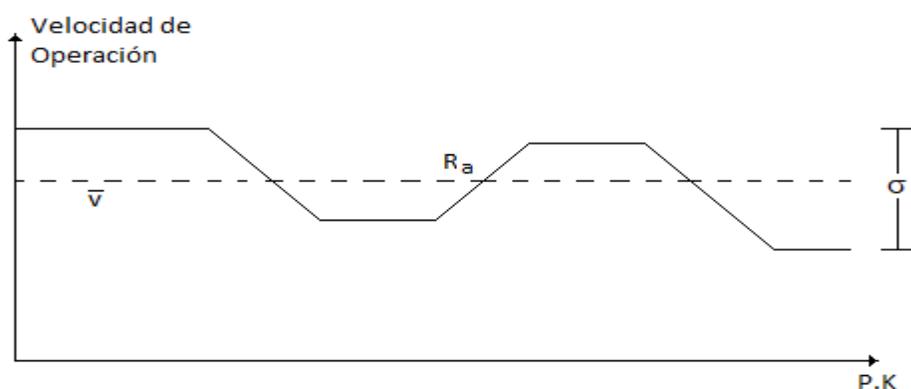


Figura 3. Esquema de aplicación del modelo global de Polus, et al. (2004).

Fuente: Elaboración Propia

Donde R_a y σ están dados por:

$$R_a = \frac{\sum |a_i|}{L}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (v_i - \bar{v})^2}$$

Tabla 5.

Umbrales para la determinación de la consistencia global de Polus et al

Parámetro	Buena	Aceptable	Pobre
R_a (m/s)	$R_a \leq 1$	$1 < R_a \leq 2$	$2 < R_a$
σ (km/h)	$\sigma \leq 5$	$5 < \sigma \leq 10$	$10 < \sigma$

Fuente: Elaboración Propia

A partir de estos dos parámetros, se desarrolló un modelo global de consistencia y se determinaron los umbrales correspondientes, estos umbrales se representan por la letra C y definen cuándo un trazado presenta consistencia buena, aceptable o pobre, ver tabla 4.

$$C = e^{-0.278[R_a(\sigma/3,6)]}$$

Tabla 6.

Umbrales del modelo global de consistencia de Polus et al.

Parámetro	Buena	Aceptable	Pobre
C (m/s)	$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$

Fuente: Elaboración Propia

3. Metodología

Para la realización en campo de este proyecto se trazaron las siguientes actividades:

3.1 Localización y estudio del tramo de vía a evaluar

Para establecer cual vía era la adecuada se realizó una búsqueda bibliográfica y revisión del estado del arte de investigaciones anteriores que mostraran las características y condiciones que deben reunir estas vías para poder ser evaluadas según el criterio de Lamm (1999). Esta búsqueda arrojó que las vías deben ser de un solo carril en doble sentido, es decir, las vías de doble calzada no se pueden tratar con estos modelos. Por consiguiente se escogió el tramo de la red vial 45A07 comprendido entre el PR68 y el PR78, ya que este tramo es una vía en doble sentido de una sola calzada, que comunica el municipio de Piedecuesta con la vía que se dirige a San Gil.



Figura 4. Mapa de Colombia, ubicación del tramo

Fuente: Instituto Nacional de Vías

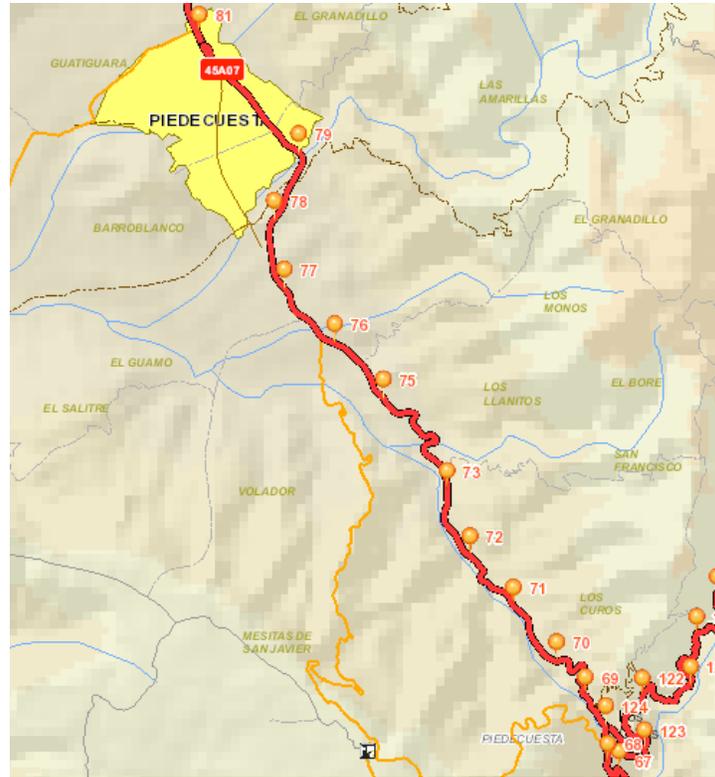


Figura 5. Tramo del PR68 al PR78

Fuente: Instituto Nacional de Vías



Figura 6. PR 78

Fuente: Elaboración propia



Figura 7. PR68

Fuente: Elaboración Propia

3.1.1 Diseño Geométrico. En nuestro caso para realizar la evaluación de la consistencia del tramo de vía es necesario conocer los elementos geométricos del trazado en especial los radios de curvatura.

En carreteras que han sido construidas recientemente es fácil obtener esta información, teniendo en cuenta que se utiliza software especializado en el área, el cual nos entrega el diseño. Cuando las carreteras han sido construidas hace muchos años es difícil acceder a esta información ya que la mayoría fueron construidas de forma empírica y por lo general no cuentan con sus respectivos diseños geométricos. Es por ello que se necesita hacer la reconstrucción del trazado geométrico de la vía existente.

Para el caso de este estudio se solicitó ante la ANI, Agencia Nacional de Infraestructura y el INVIAS Instituto Nacional de Vías los planos del diseño geométrico de la vía 45-A07 a la cual

pertenece el tramo en estudio, estas entidades se expresaron argumentando que esta vía no cuenta con dichos planos y que se encuentran en proceso de reconstrucción. Ante esta situación se optó por realizar la reconstrucción del alineamiento a nivel de planta de la vía existente. Esta reconstrucción se realizó con la ayuda del software AutoCAD Civil 3D, Google Earth y Global Mapper, con los cuales se pudieron determinar las características de los elementos geométricos del tramo de vía de estudio.

Es un tramo de 10 km de recorrido aproximadamente, ubicados entre el PR68 y el PR78, que corresponde a una vía bidireccional de una sola calzada que comunica los municipios de Piedecuesta y San Gil. La vía tiene un ancho de aproximado de 3,65 por carril, con bermas externas de aproximadamente 0,50, y en algunos tramos sin berma. La vía está ubicada en un sector de topografía montañosa, y en unos segmentos presenta pendientes suaves y en un solo trayecto una pendiente pronunciada. La velocidad de diseño en esta vía es de 30 km/h en algunos sectores suburbanos y en los sectores rurales de 60 km/h. En todo el trayecto se encontraron 98 curvas, de las cuales para el análisis solo se tienen en cuenta 69 curvas porque las otras 29 curvas no cumplen con los requerimientos exigidos para la metodología utilizada en este trabajo.

3.1.2 Volúmenes de Transito en el Tramo. Teniendo en cuenta los Volúmenes de transito suministrados por INVIAS para la territorial Santander en su informe 2014-2015, sobre la vía 45A-07, en la estación 144 ubicada en el tramo entre Piedecuesta y Curos de una longitud de 10 Km, tenemos los siguientes datos de TPDs y clasificación en porcentajes por tipo de vehículo:

Tabla 7.

Volúmenes de Tránsito

Año	TPDS	Automóviles	Buses	Camiones
		%	%	%
1997	4433	58	6	36
1998	4770	62	6	32
1999	4351	58	7	35
2000	4331	59	8	33
2001	5852	65	8	27
2002	4846	60	7	33
2003	4723	64	4	32
2004	6021	59	9	32
2005	5747	50	11	39
2006	4909	45	11	44
2007	8477	54	9	37
2008	8523	57	8	35
2009	7125	52	11	37
2010	8663	51	8	41
2011	10727	51	13	36
2012	8838	54	6	40
2013	8950	56	8	36
2014	9790	57	7	36
2015	9827	57	7	36

Fuente: Instituto Nacional de Vías

3.1.3 Accidentalidad en el Tramo. La accidentalidad en el tramo comprendido entre el PR68 y el PR78 se muestra en las siguientes tablas y gráficas, para un registro de tiempo que va desde el año 2015 a mayo de 2018.

Tabla 8.

Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 2015

Localizacion	Pr	Fecha	Lesionados	Muertos
Vda. San Francisco	KM 74+800	05/01/2015	1	1
Colorados P/Ta	KM+76 820	07/02/2015	2	0
Las Palmas	KM 75+600	10/02/2015	3	0
Colorados P/Ta	KM 76+300	14/02/2015	1	0
Colorados P/Ta	KM 76+700	01/03/2015	2	2
Los Curos	KM 72+650	03/03/2015	0	1
Los Curos	KM 68+700	09/03/2015	1	0
Colorados P/Ta	KM 76+800	07/05/2015	2	0
Vda. San Francisco	KM 74+450	18/05/2015	3	0
Colorados P/Ta	KM 76+200	28/05/2015	1	1
Colorados P/Ta	KM 76+500	30/05/2015	2	0
El Molino	KM 77+100	16/08/2015	1	0
Los Curos	KM 69+800	25/08/2015	2	0
Colorados P/Ta	KM 77+000	15/09/2015	1	0
Colorados P/Ta	KM 76+550	16/09/2015	1	0
Los Curos	KM 69+150	16/11/2015	2	0
Colorados P/Ta	KM 75+550	25/11/2015	2	0
Los Curos	KM 69+350	02/12/2015	1	0
San Francisco P/Ta	KM 74+500	06/12/2015	5	0
Los Curos	KM 69+700	28/12/2015	1	0
Total			34	5

Fuente: Policía de Carreteras.

Tabla 9.

Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2015.

Mes	# de accidentes	# de lesionados	# de muertos
Enero	1	1	1
Febrero	3	6	0
Marzo	3	3	3
Abril	0	0	0
Mayo	4	8	1
Junio	0	0	0
Julio	0	0	0
Agosto	2	3	0
Septiembre	2	2	0
Octubre	0	0	0
Noviembre	2	4	0
Diciembre	3	7	0
Totales	20	34	5

Fuente: Policía de Carreteras

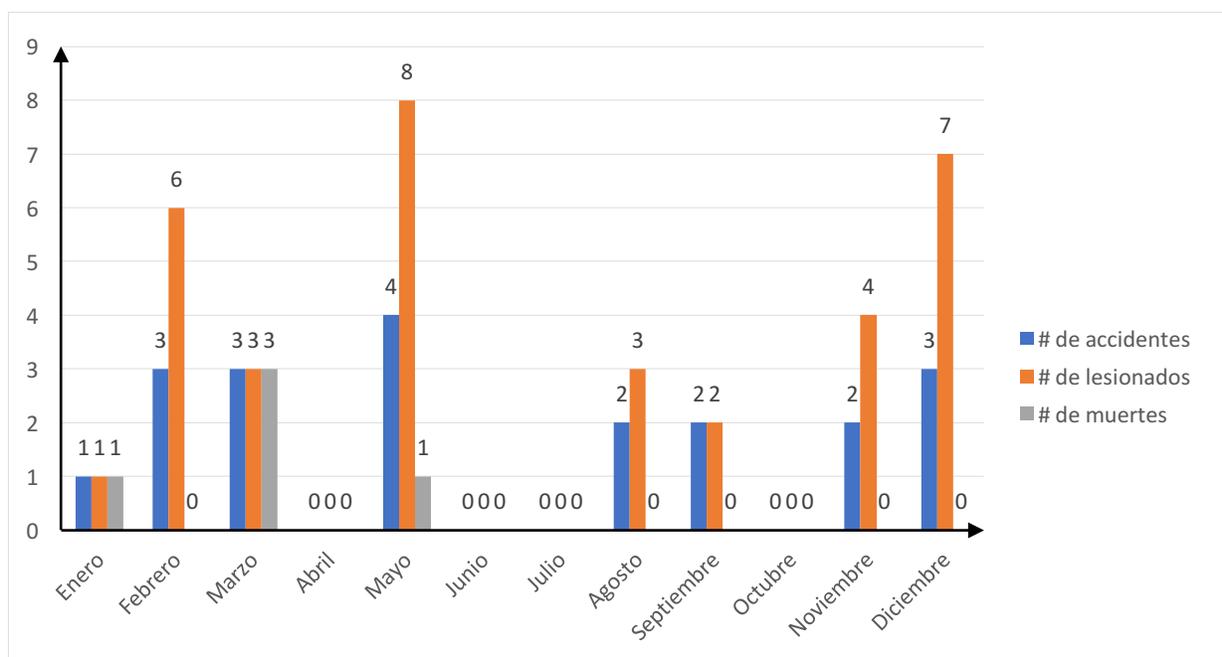


Figura 8. Accidentalidad del tramo en estudio, Año 2015.

Fuente: Policía de Carreteras

Tabla 10.

Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 201

Localizacion	Pr	Fecha	Lesionados	Muertos
Los Curos	KM 68+000	09/01/2016	2	0
Vda. San Francisco	KM 76+300	19/03/2016	4	0
Los Curos	KM 69+150	23/07/2016	1	0
Los Curos	KM 69+700	05/08/2016	0	1
Vda. San Francisco	KM 71+090	11/08/2016	2	0
Los Curos	KM 68+650	28/08/2016	1	0
Paseo Del Puente	KM 75+570	17/09/2016	1	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+800	07/11/2016	3	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+800	11/11/2016	2	0
Vda. Tres Esquinas	KM 75+920	04/12/2016	1	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+520	21/12/2016	2	0
Los Curos	KM 69+980	28/12/2016	2	0
Total			21	1

Fuente: Policía de Carreteras.

Tabla 11.

Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2016.

Mes	# de accidentes	# de lesionados	# de muertos
Enero	1	2	0
Febrero	0	0	0
Marzo	1	4	0
Abril	0	0	0
Mayo	0	0	0
Junio	0	0	0
Julio	1	1	0
Agosto	3	3	1
Septiembre	1	1	0
Octubre	0	0	0
Noviembre	2	5	0
Diciembre	3	5	0
Totales	12	21	1

Fuente: policía de Carreteras.

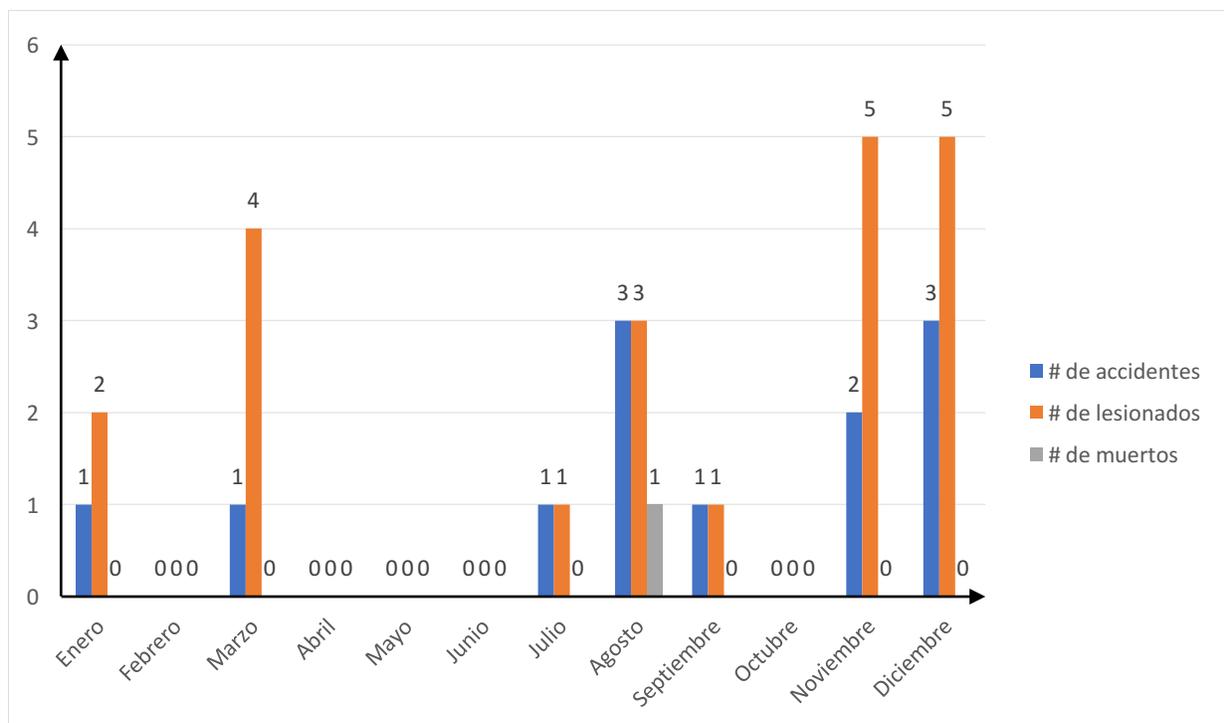


Figura 9. Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2016.

Fuente: Policía de Carreteras

Tabla 12.

Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 2017

Localización	Pr	Fecha	Lesionados	Muertos
Vda. Tres Esquinas	KM 76+720	02/01/2017	5	0
Vda. San Francisco	KM 72+600	21/01/2017	5	0
Los Curos	KM 71+610	02/02/2017	2	0
Los Curos	KM 68+500	05/02/2017	3	0
Vda. San Francisco	KM 74+500	30/03/2017	0	1
Los Curos	KM 68+400	24/06/2017	3	0
Vda. San Francisco	KM 74+450	01/07/2017	0	1
Vda. San Francisco	KM 72+330	31/07/2017	8	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+100	17/08/2017	2	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+600	19/08/2017	2	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+300	29/09/2017	4	0
Vda. San Francisco	KM 74+500	03/10/2017	25	3

Los Curos	KM 69+600	08/10/2017	1	0
Los Curos	KM 74+000	21/10/2017	1	0
Vda. San Francisco	KM 70+400	28/10/2017	1	0
Vda. San Francisco	KM 75+500	12/11/2017	1	0
Vda. Tres Esquinas	KM 76+800	26/11/2017	1	0
Vda. Tres Esquinas	KM 75+670	01/12/2017	2	0
Total			66	5

Fuente: Policía de Carreteras.

Tabla 13.

Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2017

Mes	# de accidentes	# de lesionados	# de muertos
Enero	2	10	0
Febrero	2	5	0
Marzo	1	0	1
Abril	0	0	0
Mayo	0	0	0
Junio	1	3	0
Julio	2	8	1
Agosto	2	4	0
Septiembre	1	4	0
Octubre	4	28	3
Noviembre	2	2	0
Diciembre	1	2	0
Totales	18	66	5

Fuente: Policía de Carreteras.

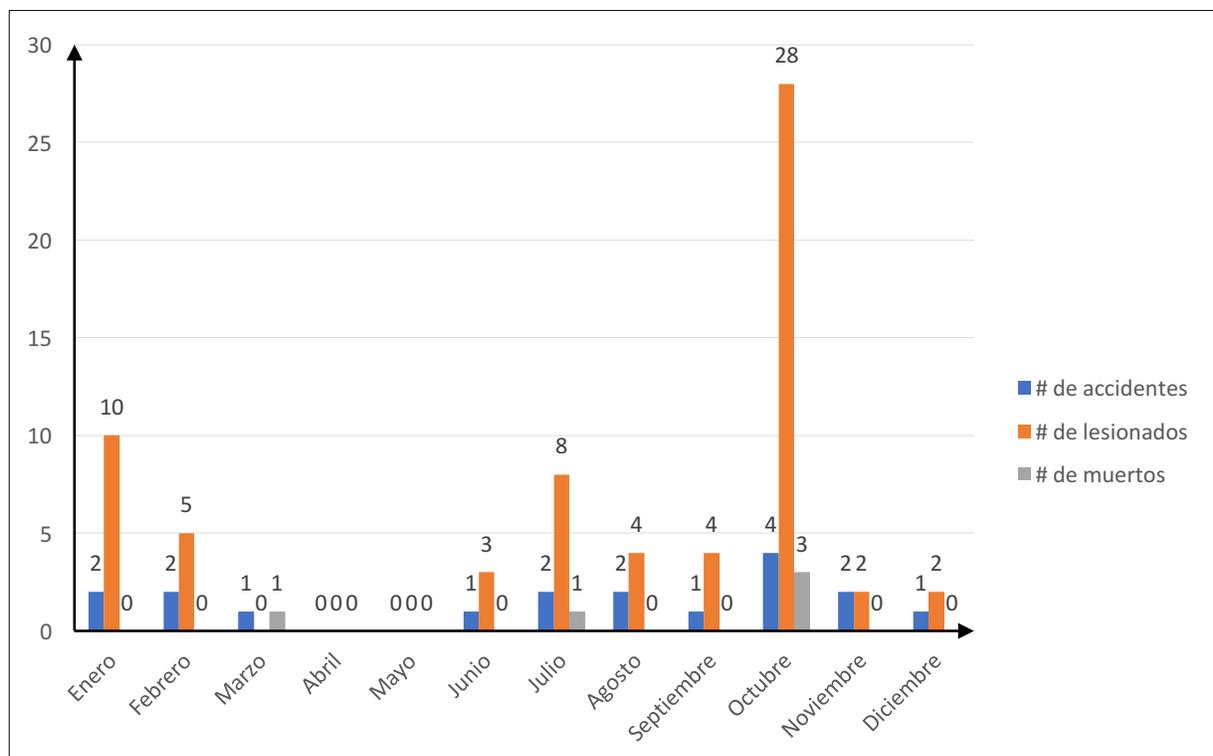


Figura 10. Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2017.

Fuente: Policía de Carreteras

Tabla 14.

Localización de los accidentes del tramo en estudio. Año 2018

Localización	Pr	Fecha	Lesionados	Muertos
Vda. San Francisco	KM 74+500	16/01/2018	0	2
Los Curos	KM 67+300	16/02/2018	1	0
Vda. Paramito	KM 73+800	07/02/2018	2	0
Vda. San Francisco	KM 74+030	28/02/2018	1	0
Vda. San Francisco	KM 71+600	12/03/2018	2	1
Vda. San Francisco	KM 71+900	01/05/2018	2	0
Total			8	3

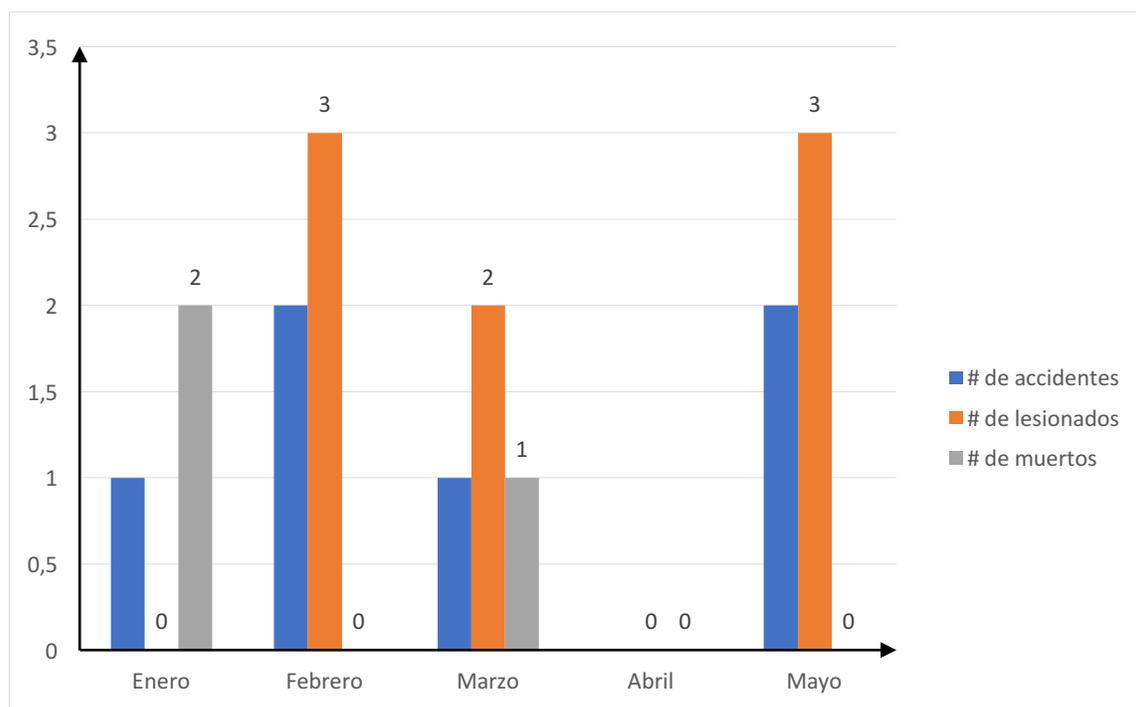
Fuente: Policía de Carreteras.

Tabla 15.

Accidentalidad del tramo en estudio. Año 2018.

Mes	# de accidentes	# de lesionados	# de muertos
Enero	1	0	2
Febrero	2	3	0
Marzo	1	2	1
Abril	0	0	0
Mayo	2	3	0
Totales	6	8	3

Fuente: Policía de Carreteras.

*Figura 11. Accidentalidad del tramo en estudio, Año 2018.*

Fuente: Policía de Carreteras

La siguiente tabla y gráfica muestra un consolidado de los accidentes anuales ocurridos en el tramo en estudio:

Tabla 16.

Accidentalidad del tramo en estudio por año

Año	No de accidentes
2015	20
2016	12
2017	18
2018	6

Fuente: Policía de Carreteras

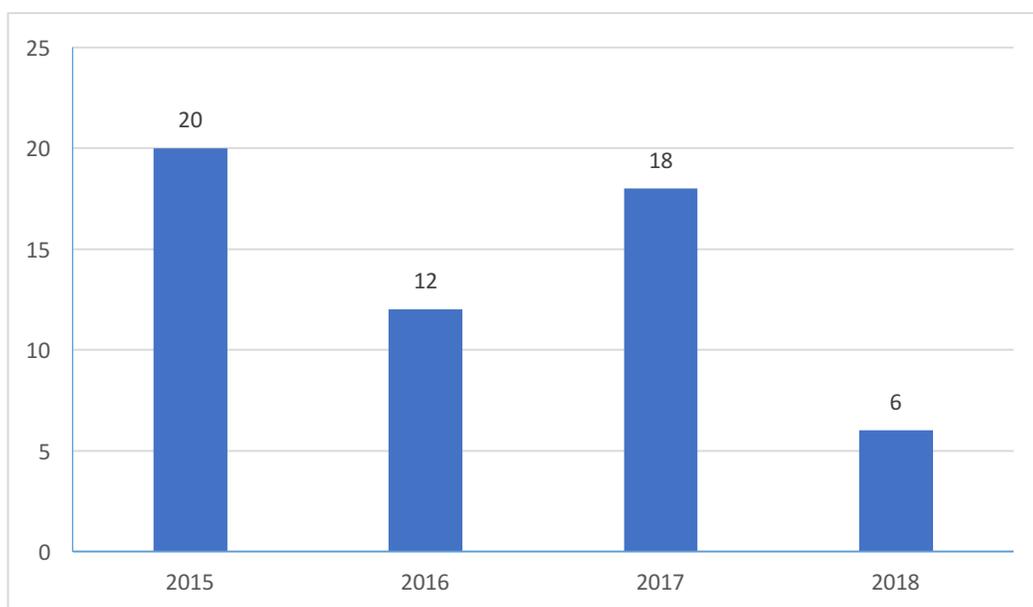


Figura 12. Accidentalidad en el tramo en estudio por años.

Fuente: Policía de carreteras

Con base en esta información el año de mayor accidentalidad fue el 2015, con un número de 34 lesionados y 5 fallecimientos, además se observa que los meses de mayor accidentalidad son octubre, enero y noviembre, los cuales corresponden a los periodos de vacaciones escolares y por ende existe un mayor flujo vehicular en carreteras, aumentando la probabilidad de más accidentes.

3.2 Procedimiento para toma de Datos en Campo

Una vez escogido el tramo se procedió a realizar un análisis de los parámetros geométricos existentes en la vía de estudio y a la toma de datos de velocidad en el tramo (Pérez A. M., 2012).

3.2.1 Calibración del Equipo Video VBox. Antes de realizar la toma de datos con el equipo Video VBox, se procedió a realizar la calibración de este, a pesar que las indicaciones dadas por el fabricante habla de una gran precisión del equipo ya que cuenta con el apoyo de doce (12) satélites para la toma y corrección de datos, pero se necesita analizar la confiabilidad de los datos en campo, para esto se realizaron dos procesos independientes para mirar el margen de error de las velocidades medidas por el VBox y las velocidades tomadas con otros equipos de medida.

Primero se registraron los tiempos de diferentes vehículos tipo automóviles pasando por los PR 76, 75,74 y 72 y midiendo a partir de ellos distancias que oscilaban entre los 34m y los 54m. las medidas en distancia se tomaron desde el PR respectivo hasta una señal de transito cercana al PR y después se procedió a registra el paso de 31 automóviles midiéndole a cada uno el tiempo de manera simultánea dos veces con dos operantes de cronómetros para registrar un tiempo más exacto del tránsito del vehículo por estos pasos. Con los datos de distancia y tiempo se calculó la velocidad en este tramo para después proceder a compararla con los datos registrados por el VBox de los 38 vehículos pasando por este mismo tramo.

Otra forma de calibración consistió en ubicar el equipo VBox a un vehículo y al mismo tiempo a este vehículo se le registró el tiempo empleado para recorrer distancias que oscilaban entre 34m y 54m, es decir, los datos fueron tomados bajo las mismas condiciones de tiempo, visibilidad y libertad de flujo en el tramo.

Los resultados arrojados son los siguientes:

Tabla 17.

Velocidades para calibración

VBOX	VR	VBOX	VR
48,70	53,40	51,20	51,30
48,60	51,90	51,30	50,80
48,70	53,40	42,50	43,90
48,20	49,60	42,70	42,40
48,60	48,40	42,30	43,40
48,90	50,20	43,00	39,20
49,10	52,20	42,70	43,70
49,10	49,30	42,80	43,60
49,40	50,20	42,50	40,70
49,60	52,50	42,90	46,20
49,60	52,60	42,50	38,90
49,90	50,10	42,50	42,90
49,90	49,30	42,50	41,40
50,20	50,10	42,20	44,50
50,40	51,70	42,20	43,70
50,10	50,60	42,00	43,10
50,60	52,40	41,90	40,50
50,30	49,90	41,90	39,20
50,60	50,10	41,90	46,20
50,90	50,30	41,90	43,10
50,80	50,20	42,00	41,90
50,90	49,20	41,60	42,20
51,20	52,60	41,90	44,50

Tabla 17. Continúa...

	50,90	51,90	41,90	40,10
	51,20	52,40	41,60	39,70
	51,20	50,80	42,00	41,10
	51,30	50,10	41,90	45,80
	51,20	50,70	41,80	45,30
	51,20	50,10	41,90	43,10
	PROM	D. S	C.V	
VBOX	46,36	4,06	0,09	
VR	46,98	4,52	0,10	

Fuente: Elaboración Propia

D.S: Desviación Estándar

C.V: Coeficiente de Variación

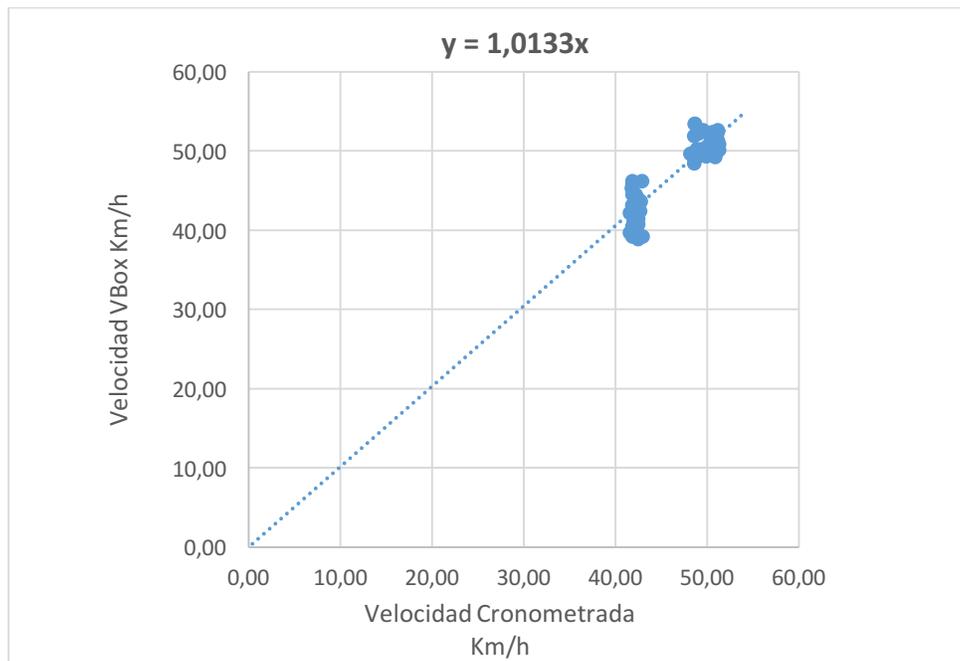


Figura 13. Gráfica de calibración de velocidades.

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que los datos en la gráfica se agrupan alrededor de la recta de pendiente 1, algunos por arriba y otros por debajo, lo cual muestra que los datos son bastantes confiables y que el equipo se encuentra calibrado.

3.2.2 Toma de Velocidades. Una vez establecido el diseño geométrico se procedió a la toma de datos de velocidad en campo, es decir, se tomó la velocidad de manejo del vehículo en dicho tramo. Para esto se hicieron 38 recorridos en vehículos tipo automóvil, que contaban con una cámara de filmación adaptada con sensores de posicionamiento y velocidad para la captura de datos.

En cada vehículo se contaba con un acompañante de conductor para que operara el equipo y a la vez darle indicaciones al conductor. Se utilizaron en total 38 conductores que tuvieran experiencia de manejo en carreteras, con edades comprendidas entre los 30 y 58 años, 30 de los cuales eran hombres y 8 mujeres. A cada conductor se le explicó que manejara como siempre lo hacía y que no cambiara su estilo de conducción.

El equipo de medición Video VBOX Lite de 10 Hz (Figura 6), es propiedad de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana, este equipo cuenta con una serie de receptores GPS y sus sensores permiten medir con gran precisión cantidades como: posición, velocidad, distancia, aceleración, distancia de frenado, dirección, ángulo de deslizamiento, fuerzas en las curvas de los vehículos. Además cuenta con una cámara para obtener imágenes digitales que se integran con los datos obtenidos. Las especificaciones operacionales del equipo son las siguientes:

Velocidad de Captura: 0,1 segundos

Distancia: Precisión de $\pm 0,05\%$

Velocidad del vehículo:	Precisión de $\pm 0,2$ Km/h
Altura:	Precisión de ± 10 m
Heading:	Precisión de $\pm 0,5^{\circ}$

El Heading mide los cambios en la orientación de la trayectoria del vehículo independientemente de la velocidad de circulación (García Ramírez, 2014).

Adicionalmente el equipo cuenta con el software Racelogic Vbox Tools, que permite procesar los datos obtenidos y con él se pueden elaborar perfiles de velocidad, reproducir los videos en forma intermodal, es decir, reproduce el video y a la vez indica la trayectoria que se está recorriendo sobre el perfil de velocidad, permite generar tablas y gráficas de los datos obtenidos.



Figura 14. Equipo VIDEO BOX

Fuente: Elaboración Propia



Figura 15. Funcionamiento del Equipo

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Análisis de los Datos Tomados en Campo

Una vez se tomaron los datos, se procedió a encontrar los perfiles continuos de velocidad de los 38 vehículos que realizaron el recorrido antes descrito.

3.3.1 Procesamiento de los datos obtenidos con el equipo Video BOX. Los datos obtenidos con el equipo Video BOX, dan una amplia gama de resultados continuos tanto de posición como de velocidad de todos los vehículos que hicieron el recorrido. Tomando en cuenta que la velocidad de manejo por lo general no cambia considerablemente en tramos pequeños, podemos exportar datos cada 5 m para disminuir el procesamiento de datos, con el fin de generar los perfiles continuos de velocidad de cada vehículo.

Tabla 18.

Ejemplo de velocidades de conductores

Abscisa	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
0	0	0	0	0	0	0
5	12,44	14,46	15,21	15,6	10,1	14,96
10	16,16	20,94	20,93	21,26	13,95	20,27
15	17,21	23,18	22,92	22,39	17,47	22,78
20	20,97	27,54	27,22	23,07	20,49	27,39
25	24,75	31,81	31,03	26,95	20,59	31,46
30	28,45	34,47	33,91	31,4	24,64	32,19

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenidos los datos de la velocidad de cada uno de los conductores, se realizó el cálculo de la velocidad de operación con un programa de fácil manejo y gran precisión como el Wolfram Mathematica.

3.3.2 Procedimiento en el Wolfram Mathematica para el cálculo de la velocidad de operación:

El procedimiento utilizado en este programa fue el siguiente:

- Importe de datos de velocidad de la curva en estudio.
- Determinación de la media aritmética y desviación estándar
- Gráfica de la distribución normal
- Cálculo de la Función de Densidad de Probabilidades (PDF)
- Cálculo de la Función de Distribución Acumulada (CDF)
- Cálculo de la Función de Error Complementaria (Erfc) a partir de la CDF

- Estimación de la velocidad de operación, para esto se iguala la función Erfc al percentil 85.

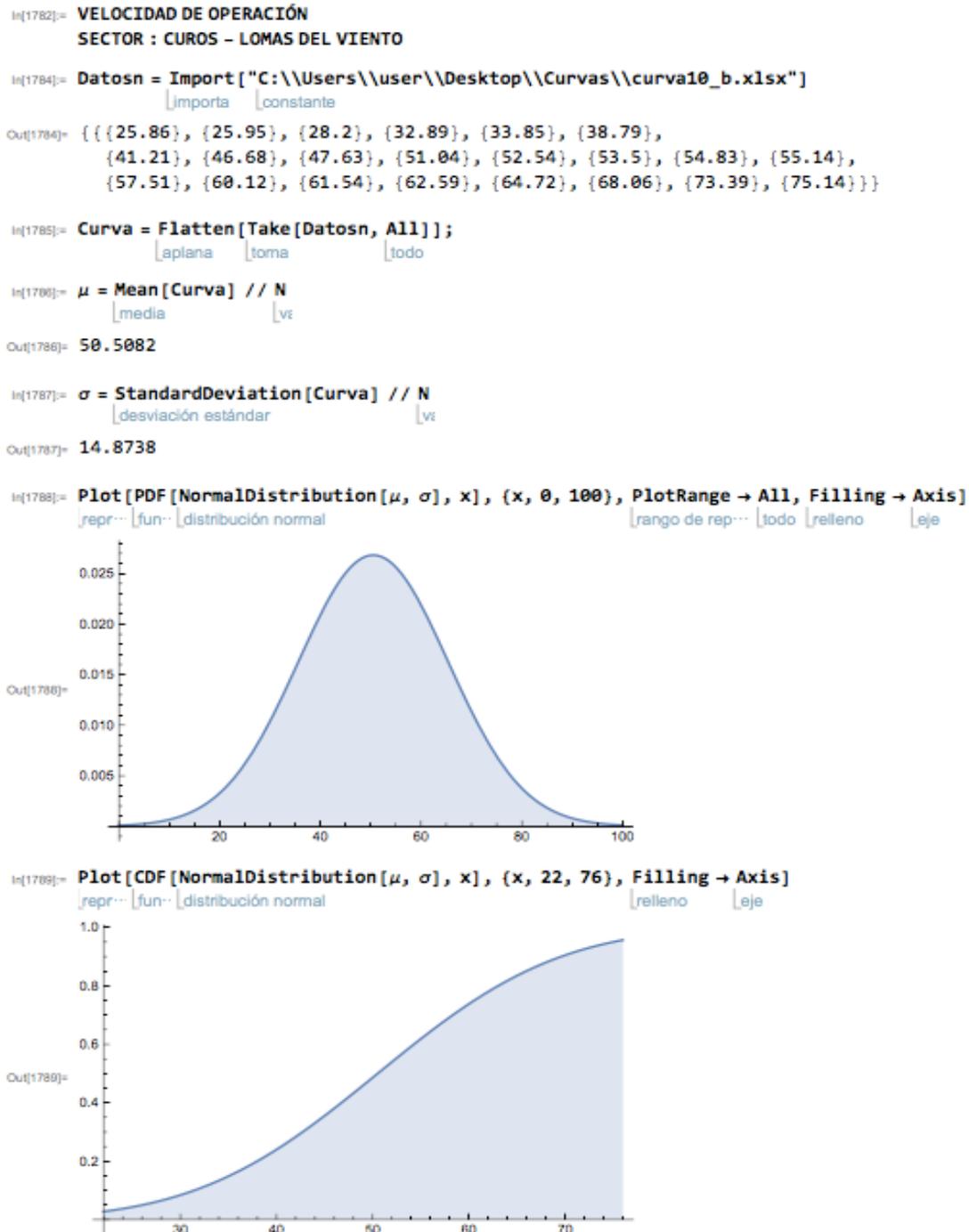


Figura 16. Distribución Normal

Fuente: Elaboración Propia

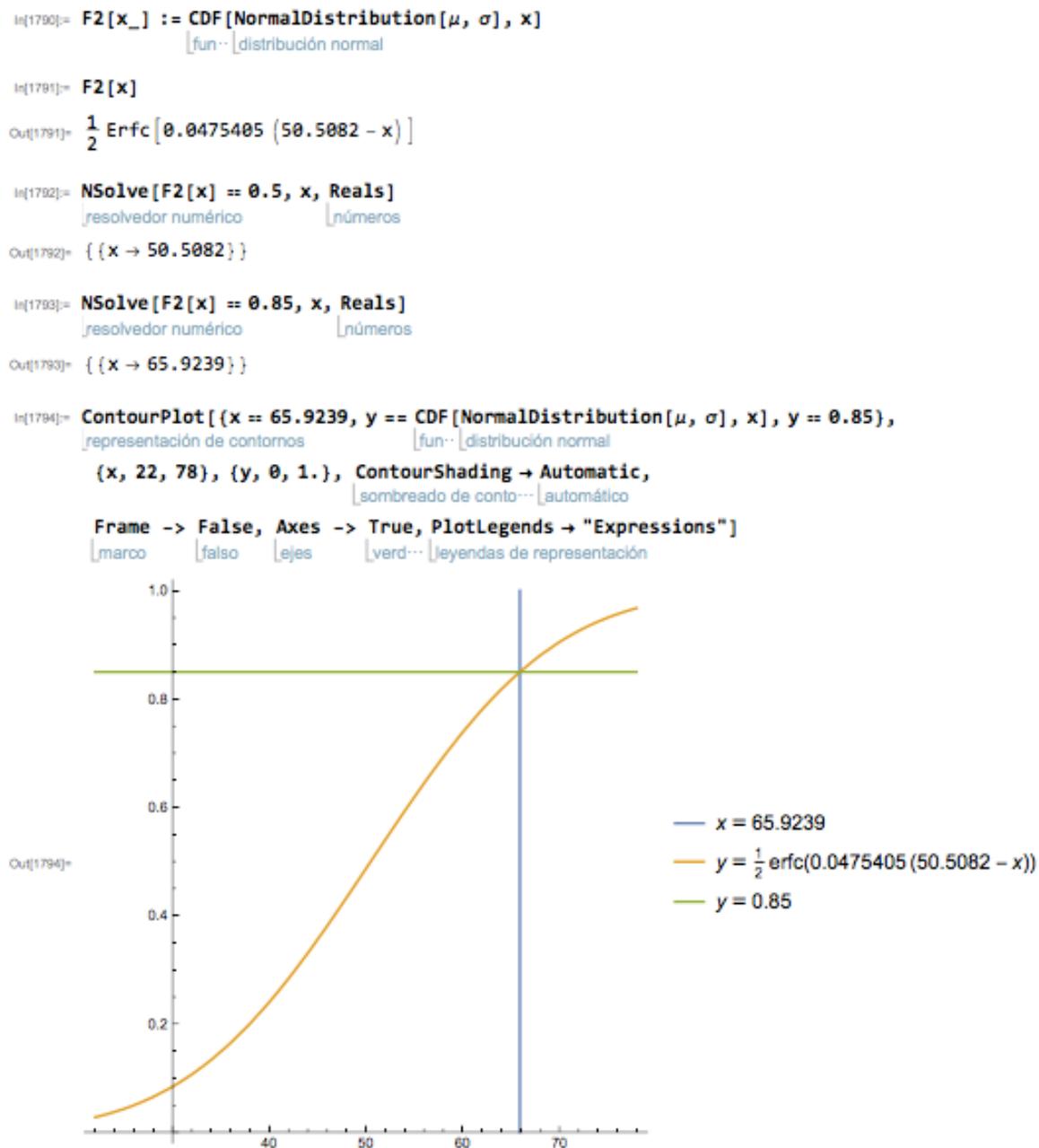


Figura 17. Distribución Normal

Fuente: Elaboración Propia

Para verificar que los resultados arrojados por el Wolfram Mathematica son correctos se realizó el cálculo de la velocidad de operación de manera independiente utilizando estadística descriptiva y la estadística inferencial.

Después de obtener los cálculos de la velocidad de operación, se procedió a localizar aquellos puntos que presentan una pobre consistencia en el trazado de la carretera, esto se realizó aplicando el criterio I y II de Lamm, et al. (1999), y (Lamm, y otros, 2007).

3.3.3 Desarrollo de los perfiles de velocidad. Con la recolección de los datos continuos en el tramo se pueden elaborar los perfiles de velocidad con la ayuda del software Racelogic Vbox Tools, el cual permite graficar la velocidad vs distancia de todos los datos obtenidos en cada recorrido.

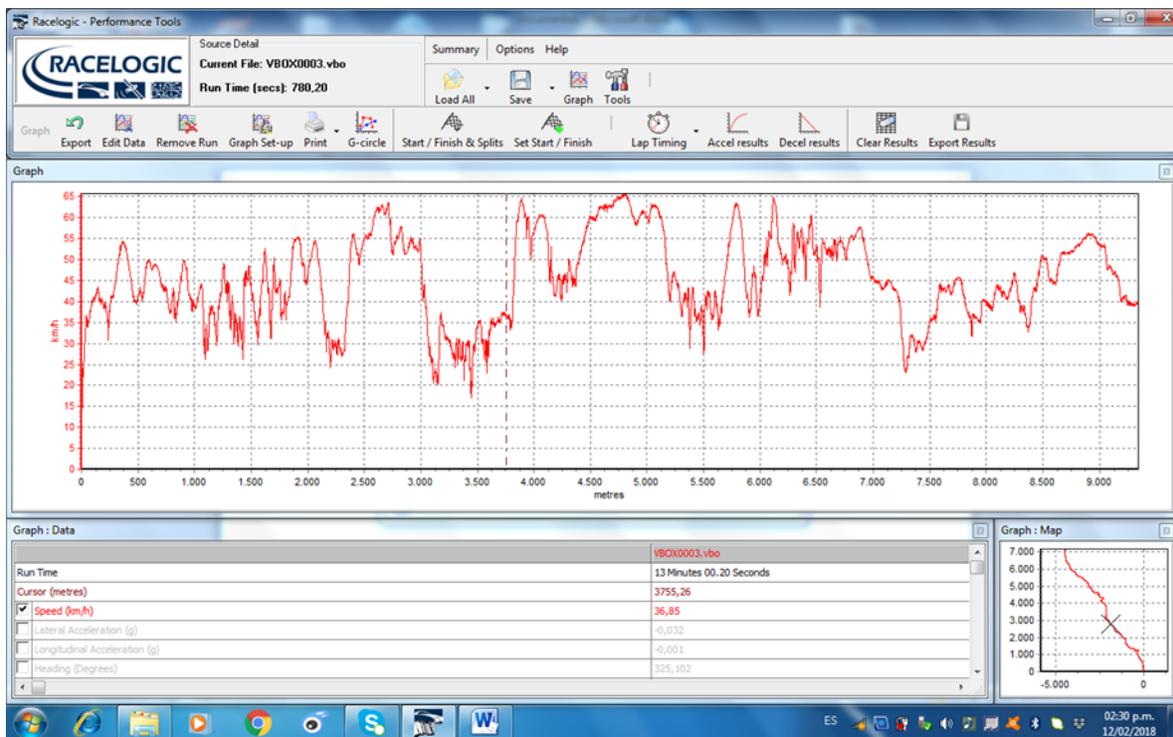


Figura 18. Perfil de velocidad individual generado por Racelogic Vbox Tools

Fuente: Elaboración Propia

4. Resultados

4.1 Velocidad de operación de las curvas horizontales

En este numeral se muestra la velocidad de operación V_{85} , en los dos sentidos, hallada con el programa Wolfram Mathematica y a su vez se da a conocer la media aritmética y la desviación estándar para cada curva.

Tabla 19.

Velocidad de operación de las curvas horizontales, en el sentido Curos-Lomas del Viento.

No. Curva	Media aritmética	Desviación estándar	Velocidad Operación	No. Curva	Media aritmética	Desviación estándar	Velocidad Operación
1	40,80	8,05	49,14	36	39,68	4,44	44,29
2	44,66	8,74	53,72	37	44,41	5,97	50,60
3	39,57	5,97	45,75	38	50,26	9,05	59,64
4	39,41	3,18	42,71	39	53,80	8,71	62,82
5	40,33	5,88	46,43	40	49,98	9,04	59,35
6	37,04	6,96	44,25	41	41,86	5,90	47,97
7	41,42	8,36	50,09	42	40,08	5,46	45,74
8	46,40	16,18	63,17	43	44,28	6,99	51,53
9	44,13	14,82	59,49	44	45,96	7,92	54,16
10	50,51	14,87	65,92	45	45,99	7,73	54,01
11	53,10	14,41	68,04	46	48,27	11,52	60,21
12	48,20	11,55	60,17	47	43,66	7,85	51,80
13	48,52	10,36	59,26	48	46,29	9,80	56,45
14	43,25	9,27	52,85	49	52,75	8,80	61,87
15	39,63	8,42	48,36	50	52,33	10,43	63,14
16	33,93	6,04	41,19	51	39,87	9,24	49,44
17	35,65	7,32	43,24	52	47,91	10,69	58,99
18	43,27	7,37	50,91	53	45,61	6,45	52,29
19	45,68	7,07	53,00	54	44,76	5,07	50,01
20	52,15	7,02	59,43	55	46,66	4,90	51,74

Tabla 19. Continúa...

21	52,50	7,04	59,79	56	44,95	7,83	53,07
22	52,94	7,25	60,46	57	43,45	6,55	50,23
23	48,21	7,87	56,37	58	44,52	5,95	50,68
24	49,32	7,98	57,59	59	43,67	4,34	48,17
25	51,44	6,08	57,74	60	45,85	5,54	51,59
26	54,41	8,07	62,77	61	40,61	6,82	47,68
27	57,17	9,55	67,06	62	43,78	6,59	50,62
28	60,59	9,52	70,46	63	52,04	5,26	57,48
29	59,33	7,97	67,59	64	51,58	7,77	59,63
30	59,88	8,76	68,96	65	48,82	6,08	55,11
31	61,71	8,44	70,45	66	52,55	7,57	60,39
32	51,59	9,33	61,25	67	56,66	7,99	64,94
33	46,58	7,70	54,56	68	30,66	8,51	39,49
34	41,22	4,02	45,39	69	32,04	7,15	39,46
35	39,65	5,42	45,26				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20.

Velocidad de operación de las curvas horizontales, en el sentido Lomas del Viento-Curos.

No. Curva	Media aritmética	Desviación estándar	Velocidad Operación	No. Curva	Media aritmética	Desviación estándar	Velocidad Operación
1	43,38	6,26	49,86	36	50,55	6,02	56,79
2	57,96	5,71	63,87	37	47,39	5,18	52,76
3	48,84	6,50	55,57	38	46,02	5,81	52,04
4	51,26	5,57	57,03	39	41,72	5,36	47,28
5	49,72	6,22	56,17	40	39,80	4,88	44,86
6	47,57	6,48	54,29	41	35,86	4,46	40,48
7	44,07	6,90	51,21	42	34,29	4,54	39,00
8	53,50	5,33	59,02	43	38,56	5,77	44,54
9	54,14	5,21	59,54	44	44,44	5,87	50,52
10	50,78	5,18	56,16	45	42,66	6,70	49,60
11	50,43	5,43	56,06	46	45,34	8,35	54,00
12	43,91	6,18	50,31	47	43,67	9,73	53,75
13	45,16	6,23	51,62	48	39,95	10,84	51,19
14	46,35	6,46	53,04	49	43,55	9,86	53,77

Tabla 20. Continúa...

15	45,07	5,76	51,04	50	43,62	10,39	54,38
16	37,50	5,51	43,21	51	40,43	9,37	50,15
17	40,68	4,48	45,33	52	41,21	10,65	52,25
18	46,68	5,49	52,37	53	39,52	8,76	48,60
19	40,01	4,65	44,83	54	33,55	6,46	40,24
20	38,26	5,27	43,73	55	33,96	6,47	40,66
21	42,02	4,79	46,98	56	33,20	7,01	40,47
22	40,50	6,77	47,51	57	30,26	9,41	40,01
23	44,49	4,62	49,28	58	33,90	6,55	40,69
24	55,96	7,04	63,26	59	36,07	6,55	42,86
25	54,93	6,72	61,89	60	33,13	5,73	39,07
26	55,13	7,67	63,08	61	37,05	4,57	41,79
27	56,35	6,84	63,44	62	38,34	6,48	45,06
28	57,00	7,14	64,41	63	38,06	5,51	43,77
29	54,46	5,06	59,71	64	38,20	5,67	44,08
30	51,00	4,67	55,84	65	38,06	6,76	45,07
31	49,37	3,79	53,30	66	41,41	7,71	49,40
32	46,97	3,56	50,67	67	40,96	8,37	49,63
33	49,68	3,62	53,43	68	43,36	7,11	50,73
34	56,34	6,24	62,81	69	44,30	6,91	51,46
35	58,02	7,88	66,19				

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Comparación de la Velocidad de operación con la Velocidad de Diseño de las curvas horizontales

La comparación de la velocidad de operación con la velocidad de diseño se realizó bajo los criterios de Lamm, los cuales fueron explicados en el marco teórico.

Tabla 21.

Umbral de Lamm et al, según criterio I, sentido Curos-Lomas del Viento.

No. Curva	Velocidad Operación Vo	Velocidad de Diseño Vd	Diferencia Vo-Vd	Buena Vo-Vd ≤10	Aceptable 10 < Vo-Vd ≤20	Pobre Vo-Vd >20
1	49,14	60,00	10,86		X	
2	53,72	60,00	6,28	X		
3	45,75	60,00	14,25		X	
4	42,71	60,00	17,29		X	
5	46,43	60,00	13,57		X	
6	44,25	60,00	15,75		X	
7	50,09	60,00	9,91	X		
8	63,17	60,00	3,17	X		
9	59,49	60,00	0,51	X		
10	65,92	60,00	5,92	X		
11	68,04	60,00	8,04	X		
12	60,17	60,00	0,17	X		
13	59,26	60,00	0,74	X		
14	52,85	60,00	7,15	X		
15	48,36	60,00	11,64		X	
16	41,19	60,00	18,81		X	
17	43,24	60,00	16,76		X	
18	50,91	60,00	9,09	X		
19	53,00	60,00	7,00	X		
20	59,43	60,00	0,57	X		
21	59,79	60,00	0,21	X		
22	60,46	60,00	0,46	X		
23	56,37	60,00	3,63	X		
24	57,59	60,00	2,41	X		
25	57,74	60,00	2,26	X		
26	62,77	60,00	2,77	X		
27	67,06	60,00	7,06	X		
28	70,46	60,00	10,46		X	
29	67,59	60,00	7,59	X		
30	68,96	60,00	8,96	X		
31	70,45	60,00	10,45		X	
32	61,25	60,00	1,25	X		
33	54,56	60,00	5,44	X		

Tabla 21. Continúa...

34	45,39	60,00	14,61		X
35	45,26	60,00	14,74		X
36	44,29	60,00	15,71		X
37	50,60	60,00	9,40	X	
38	59,64	60,00	0,36	X	
39	62,82	60,00	2,82	X	
40	59,35	60,00	0,65	X	
41	47,97	60,00	12,03		X
42	45,74	60,00	14,26		X
43	51,53	60,00	8,47	X	
44	54,16	60,00	5,84	X	
45	54,01	60,00	5,99	X	
46	60,21	60,00	0,21	X	
47	51,80	60,00	8,20	X	
48	56,45	60,00	3,55	X	
49	61,87	60,00	1,87	X	
50	63,14	60,00	3,14	X	
51	49,44	60,00	10,56		X
52	58,99	60,00	1,01	X	
53	52,29	60,00	7,71	X	
54	50,01	60,00	9,99	X	
55	51,74	60,00	8,26	X	
56	53,07	60,00	6,93	X	
57	50,23	60,00	9,77	X	
58	50,68	60,00	9,32	X	
59	48,17	60,00	11,83		X
60	51,59	60,00	8,41	X	
61	47,68	60,00	12,32		X
62	50,62	60,00	9,38	X	
63	57,48	60,00	2,52	X	
64	59,63	60,00	0,37	X	
65	55,11	60,00	4,89	X	
66	60,39	60,00	0,39	X	
67	64,94	60,00	4,94	X	
68	39,49	60,00	20,51		X
69	39,46	60,00	20,54		X

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22.

Umbral de Lamm et al, según criterio I, sentido Lomas del Viento-Curos.

No. Curva	Velocidad Operación Vo	Velocidad de Diseño Vd	Diferencia Vo-Vd	Buena Vo-Vd ≤10	Aceptable 10 < Vo-Vd ≤20	Pobre Vo-Vd >20
1	49,86	60,00	10,14		x	
2	63,87	60,00	3,87	x		
3	55,57	60,00	4,43	x		
4	57,03	60,00	2,97	x		
5	56,17	60,00	3,83	x		
6	54,29	60,00	5,71	x		
7	51,21	60,00	8,79	x		
8	59,02	60,00	0,98	x		
9	59,54	60,00	0,46	x		
10	56,16	60,00	3,84	x		
11	56,06	60,00	3,94	x		
12	50,31	60,00	9,69	x		
13	51,62	60,00	8,38	x		
14	53,04	60,00	6,96	x		
15	51,04	60,00	8,96	x		
16	43,21	60,00	16,79		x	
17	45,33	60,00	14,67		x	
18	52,37	60,00	7,63	x		
19	44,83	60,00	15,17		x	
20	43,73	60,00	16,27		x	
21	46,98	60,00	13,02		x	
22	47,51	60,00	12,49		x	
23	49,28	60,00	10,72		x	
24	63,26	60,00	3,26	x		
25	61,89	60,00	1,89	x		
26	63,08	60,00	3,08	x		
27	63,44	60,00	3,44	x		
28	64,41	60,00	4,41	x		
29	59,71	60,00	0,29	x		
30	55,84	60,00	4,16	x		
31	53,30	60,00	6,70	x		
32	50,67	60,00	9,33	x		
33	53,43	60,00	6,57	x		

Tabla 22. Continúa...

34	62,81	60,00	2,81	x		
35	66,19	60,00	6,19	x		
36	56,79	60,00	3,21	x		
37	52,76	60,00	7,24	x		
38	52,04	60,00	7,96	x		
39	47,28	60,00	12,72			x
40	44,86	60,00	15,14			x
41	40,48	60,00	19,52			x
42	39,00	60,00	21,00			x
43	44,54	60,00	15,46			x
44	50,52	60,00	9,48	x		
45	49,60	60,00	10,40			x
46	54,00	60,00	6,00	x		
47	53,75	60,00	6,25	x		
48	51,19	60,00	8,81	x		
49	53,77	60,00	6,23	x		
50	54,38	60,00	5,62	x		
51	50,15	60,00	9,85	x		
52	52,25	60,00	7,75	x		
53	48,60	60,00	11,40			x
54	40,24	60,00	19,76			x
55	40,66	60,00	19,34			x
56	40,47	60,00	19,53			x
57	40,01	60,00	19,99			x
58	40,69	60,00	19,31			x
59	42,86	60,00	17,14			x
60	39,07	60,00	20,93			x
61	41,79	60,00	18,21			x
62	45,06	60,00	14,94			x
63	43,77	60,00	16,23			x
64	44,08	60,00	15,92			x
65	45,07	60,00	14,93			x
66	49,40	60,00	10,60			x
67	49,63	60,00	10,37			x
68	50,73	60,00	9,27	x		
69	51,46	60,00	8,54	x		

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23.

Umbral de Lamm et al, según criterio II, sentido Curos-lomas del viento.

No. Curva	Velocidad Operación Vo	Velocidad de Diseño Vd	Diferencia Voi-Voi+1	Buena	Acceptable	Pobre
				Voi-Voi+1 ≤ 10	10 < Voi-Voi+1 ≤ 20	Voi-Voi+1 > 20
1	49,14	60,00	4,58	X		
2	53,72	60,00	7,97	X		
3	45,75	60,00	3,04	X		
4	42,71	60,00	3,72	X		
5	46,43	60,00	2,18	X		
6	44,25	60,00	5,84	X		
7	50,09	60,00	13,08		X	
8	63,17	60,00	3,68	X		
9	59,49	60,00	6,43	X		
10	65,92	60,00	2,12	X		
11	68,04	60,00	7,87	X		
12	60,17	60,00	0,91	X		
13	59,26	60,00	6,41	X		
14	52,85	60,00	4,49	X		
15	48,36	60,00	7,17	X		
16	41,19	60,00	2,05	X		
17	43,24	60,00	7,67	X		
18	50,91	60,00	2,09	X		
19	53,00	60,00	6,43	X		
20	59,43	60,00	0,36	X		
21	59,79	60,00	0,67	X		
22	60,46	60,00	4,09	X		
23	56,37	60,00	1,22	X		
24	57,59	60,00	0,15	X		
25	57,74	60,00	5,03	X		
26	62,77	60,00	4,29	X		
27	67,06	60,00	3,40	X		
28	70,46	60,00	2,87	X		
29	67,59	60,00	1,37	X		
30	68,96	60,00	1,49	X		
31	70,45	60,00	9,20	X		
32	61,25	60,00	6,69	X		
33	54,56	60,00	9,17	X		
34	45,39	60,00	0,13	X		
35	45,26	60,00	0,97	X		
36	44,29	60,00	6,31	X		
37	50,60	60,00	9,04	X		

Tabla 23. Continúa...

38	59,64	60,00	3,18	X	
39	62,82	60,00	3,47	X	
40	59,35	60,00	11,38		X
41	47,97	60,00	2,23	X	
42	45,74	60,00	5,79	X	
43	51,53	60,00	2,63	X	
44	54,16	60,00	0,15	X	
45	54,01	60,00	6,20	X	
46	60,21	60,00	8,41	X	
47	51,80	60,00	4,65	X	
48	56,45	60,00	5,42	X	
49	61,87	60,00	1,27	X	
50	63,14	60,00	13,70		X
51	49,44	60,00	9,55		
52	58,99	60,00	6,70	X	
53	52,29	60,00	2,28	X	
54	50,01	60,00	1,73	X	
55	51,74	60,00	1,33	X	
56	53,07	60,00	2,84	X	
57	50,23	60,00	0,45	X	
58	50,68	60,00	2,51	X	
59	48,17	60,00	3,42	X	
60	51,59	60,00	3,91	X	
61	47,68	60,00	2,94	X	
62	50,62	60,00	6,86	X	
63	57,48	60,00	2,15	X	
64	59,63	60,00	4,52	X	
65	55,11	60,00	5,28	X	
66	60,39	60,00	4,55	X	
67	64,94	60,00	25,45		X
68	39,49	60,00	0,03	X	
69	39,46	60,00			

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24.

Umbral de Lamm et al, según criterio II, sentido Lomas del Viento-Curos.

No. Curva	Velocidad Operación V _o	Velocidad de Diseño V _d	Diferencia Voi-Voi+1	Buena	Acceptable	Pobre
				Voi-Voi+1 ≤ 10	10 > Voi-Voi+1 ≤ 20	20 < Voi-Voi+1
1	49,86	60,00	14,01		X	
2	63,87	60,00	8,30	X		
3	55,57	60,00	1,46	X		
4	57,03	60,00	0,86	X		
5	56,17	60,00	1,88	X		
6	54,29	60,00	3,08	X		
7	51,21	60,00	7,81	X		
8	59,02	60,00	0,52	X		
9	59,54	60,00	3,38	X		
10	56,16	60,00	0,10	X		
11	56,06	60,00	5,75	X		
12	50,31	60,00	1,31	X		
13	51,62	60,00	1,42	X		
14	53,04	60,00	2,00	X		
15	51,04	60,00	7,83	X		
16	43,21	60,00	2,12	X		
17	45,33	60,00	7,04	X		
18	52,37	60,00	7,54	X		
19	44,83	60,00	1,10	X		
20	43,73	60,00	3,25	X		
21	46,98	60,00	0,53	X		
22	47,51	60,00	1,77	X		
23	49,28	60,00	13,98		X	
24	63,26	60,00	1,37	X		
25	61,89	60,00	1,19	X		
26	63,08	60,00	0,36	X		
27	63,44	60,00	0,97	X		
28	64,41	60,00	4,70	X		
29	59,71	60,00	3,87	X		
30	55,84	60,00	2,54	X		
31	53,30	60,00	2,63	X		
32	50,67	60,00	2,76	X		
33	53,43	60,00	9,38	X		

Tabla 24. Continúa...

34	62,81	60,00	3,38	X
35	66,19	60,00	9,40	X
36	56,79	60,00	4,03	X
37	52,76	60,00	0,72	X
38	52,04	60,00	4,76	X
39	47,28	60,00	2,42	X
40	44,86	60,00	4,38	X
41	40,48	60,00	1,48	X
42	39,00	60,00	5,54	X
43	44,54	60,00	5,98	X
44	50,52	60,00	0,92	X
45	49,60	60,00	4,40	X
46	54,00	60,00	0,25	X
47	53,75	60,00	2,56	X
48	51,19	60,00	2,58	X
49	53,77	60,00	0,61	X
50	54,38	60,00	4,23	X
51	50,15	60,00	2,10	X
52	52,25	60,00	3,65	X
53	48,60	60,00	8,36	X
54	40,24	60,00	0,42	X
55	40,66	60,00	0,19	X
56	40,47	60,00	0,46	X
57	40,01	60,00	0,68	X
58	40,69	60,00	2,17	X
59	42,86	60,00	3,79	X
60	39,07	60,00	2,72	X
61	41,79	60,00	3,27	X
62	45,06	60,00	1,29	X
63	43,77	60,00	0,31	X
64	44,08	60,00	0,99	X
65	45,07	60,00	4,33	X
66	49,40	60,00	0,23	X
67	49,63	60,00	1,10	X
68	50,73	60,00	0,73	X
69	51,46	60,00		

Fuente: Elaboración Propia

5. Análisis de Resultados

5.1 Comparación de la velocidad de operación con la velocidad de diseño de las curvas horizontales.

La comparación se hizo tomando el valor absoluto de la diferencia de la velocidad de diseño y la velocidad de operación, para cada uno de los sentidos y se puede observar que el promedio en los dos sentidos es de alrededor de 7,56 Km/h bajando y 9,56 Km/h subiendo, lo que según el criterio I de Lamm es bueno y esta velocidad no representa un riesgo para los conductores.

Sin embargo, mirando las curvas por separado, se encuentra que algunas tienen una velocidad de operación aceptable y muy pocas, solo dos, un valor de velocidad de operación pobre, lo cual implica que estas curvas presentan inconsistencias entre el diseño y el trazado existente.

En la siguiente tabla se muestra la diferencia mínima y máxima y el promedio de la velocidad de operación.

Tabla 25.

Diferencia de velocidades mínima, máxima, promedio en el sentido Curos-Lomas del Viento

Diferencia $ V_o - V_d $	Km/h
Mínima	0,17
Máxima	20,54
Promedio	7,56

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26.

Diferencia de velocidades mínima, máxima, promedio en el sentido Lomas del Viento-Curos

Diferencia Vo-Vd 	Km/h
Mínima	0,29
Máxima	20,93
Promedio	9,86

Fuente: Elaboración Propia

5.2 Análisis de Consistencia

Para Realizar el análisis de consistencia se utilizaron los criterios I y II de Lamm, et al. (1999), con sus respectivos umbrales

Criterio I

Bajo este criterio se obtuvo que el 71% de las curvas, es decir, 49 curvas son consistentes, 26% de las curvas, es decir, 18 curvas son aceptables y solo el 3% son pobres en consistencia, pero solo equivale a 2 curvas, en el sentido Curos-Lomas del Viento.

Tabla 27.

Evaluación de la consistencia según el criterio I de Lamm et al en el sentido Curos-Lomas del Viento

Umbral de Lamm et al	Número de Curvas	Porcentaje %
Buena	49	71
Aceptable	18	26
Pobre	2	3

Fuente: Elaboración Propia

Para el sentido Lomas del viento-Curos se obtuvo que el 58% de las curvas son consistentes, el 39% son aceptables y solo el 3% son pobres en consistencia.

Tabla 28.

Evaluación de la consistencia según el criterio I de Lamm et al (1999), en el sentido Lomas del Viento-Curos

Umbral de Lamm et al	Número de Curvas	Porcentaje %
Buena	40	58
Aceptable	27	39
Pobre	2	3

Fuente: Elaboración Propia

Se puede decir que el tramo de la vía es consistente puesto que el 97% de las curvas se encuentran bajo el umbral de bueno y aceptable y solo el 3% es pobre consistentemente, lo cual se puede apreciar en las siguientes gráficas:

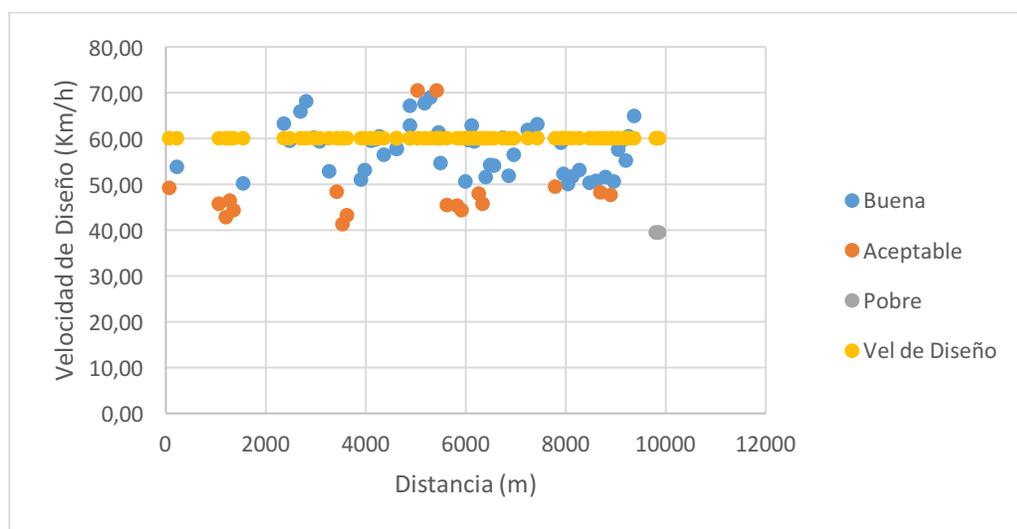


Figura 19. Gráfica consistencia Criterio I de lamm: Curos- Lomas del Viento

Fuente: Elaboración Propia

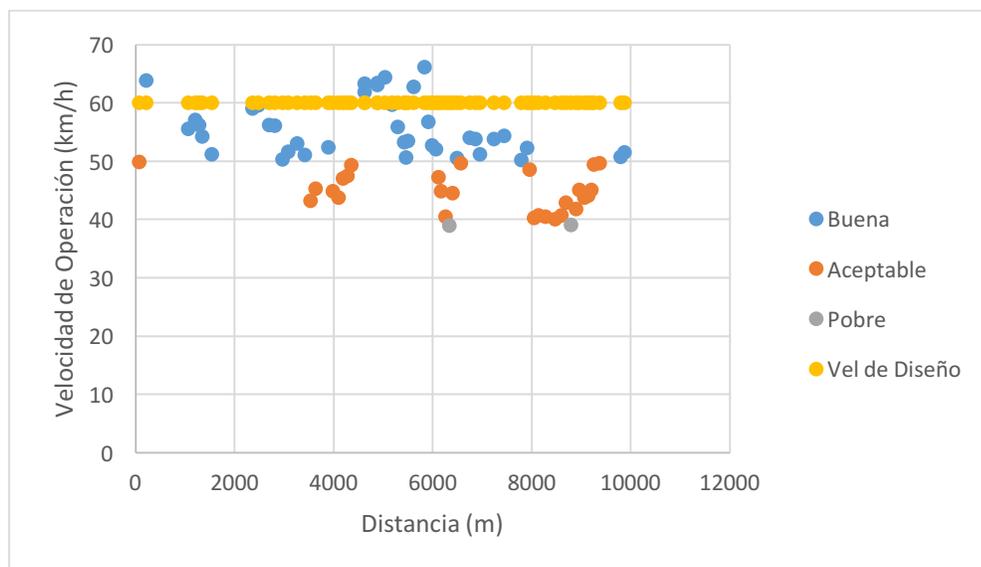


Figura 20. Gráfica de Consistencia Criterio I de Lamm: Lomas del Viento-Curos

Fuente: Elaboración Propia

Criterio II

Bajo este criterio se obtuvo que el 94,2% de las curvas, es decir, 64 curvas son consistentes, 4,3% de las curvas, es decir, 3 curvas son aceptables y solo el 1,5% son pobres en consistencia, que solo equivale a 1 curva, en el sentido Curos-Lomas del Viento.

Tabla 29.

Evaluación de la consistencia según el criterio II de Lamm et al en el sentido Curos - Lomas del Viento

Umbral de Lamm et al	Número de Curvas	Porcentaje %
Buena	64	94,2
Aceptable	3	4,3
Pobre	1	1,5

Fuente: Elaboración Propia

Para el sentido Lomas del viento-Curos se obtuvo que el 97% de las curvas son consistentes y el 3% son aceptables y ninguna curva es pobre en consistencia.

Tabla 30.

Evaluación de la consistencia según el criterio II de Lamm et al en el sentido Lomas del Viento-Curos

Umbral de Lamm et al	Número de Curvas	Porcentaje %
Buena	67	97
Aceptable	3	3
Pobre	0	0

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Análisis Estadístico

Se pretende determinar si es conveniente utilizar algún modelo ya desarrollado para el cálculo de la V_{85} y su utilización en Colombia, Para eso se toman algunos modelos y mediante el cálculo de parámetros estadísticos se observa la conveniencia de utilizarlo.

Los modelos analizados son los siguientes:

- Mc Lean 1981
$$v_{85} = 101.2 - \frac{2730}{R}$$
- Glennon et al 1986
$$v_{85} = 103.96 - \frac{4524.94}{R}$$
- Lamm et al 1988
$$v_{85} = 94.398 - \frac{3188.656}{R}$$
- Kanellaidis et al 1990
$$v_{85} = 129.88 - \frac{623.1}{\sqrt{R}}$$

- Ottesen 1993
$$v_{85} = 103.64 - \frac{3400.73}{R}$$
- Islamm y Seneviratne 1994
$$v_{85} = 103.3 - \frac{4208.76}{R} - \frac{36597.92}{R^2}$$
- Castro et al 2008
$$v_{85} = 120.16 - \frac{5596.72}{R}$$
- Perez-Zuriaga 2010
$$v_{85} = 102,048 - \frac{3990.26}{R}$$

Las gráficas y la tabla de valores para cada uno de estos modelos son las siguientes:

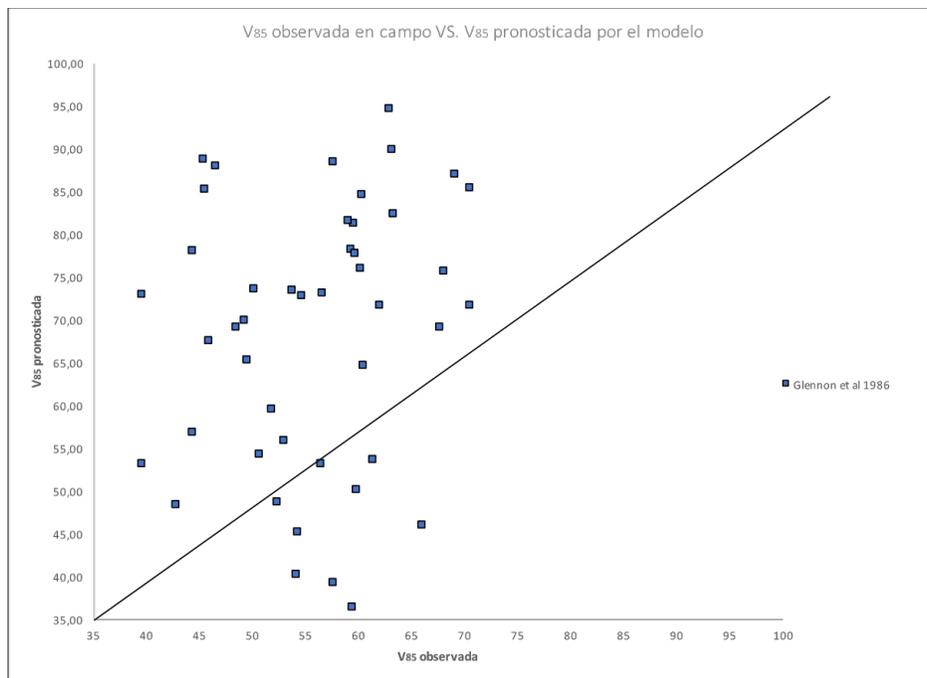


Figura 21. Gráfica V85 Modelo Mclean

Fuente: Elaboración Propia

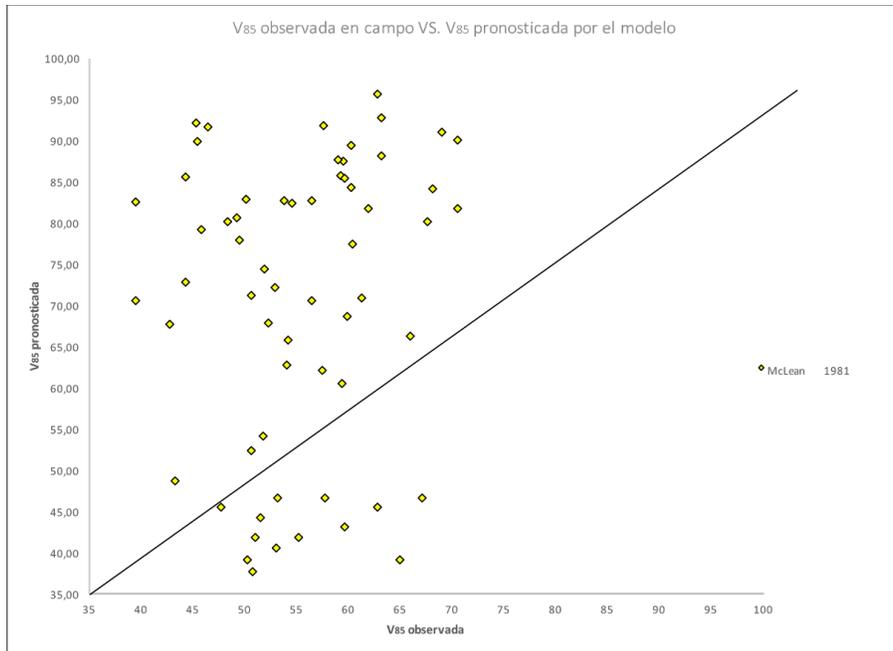


Figura 22. Gráfica V85 Modelo Glennon et Al

Fuente: Elaboración Propia

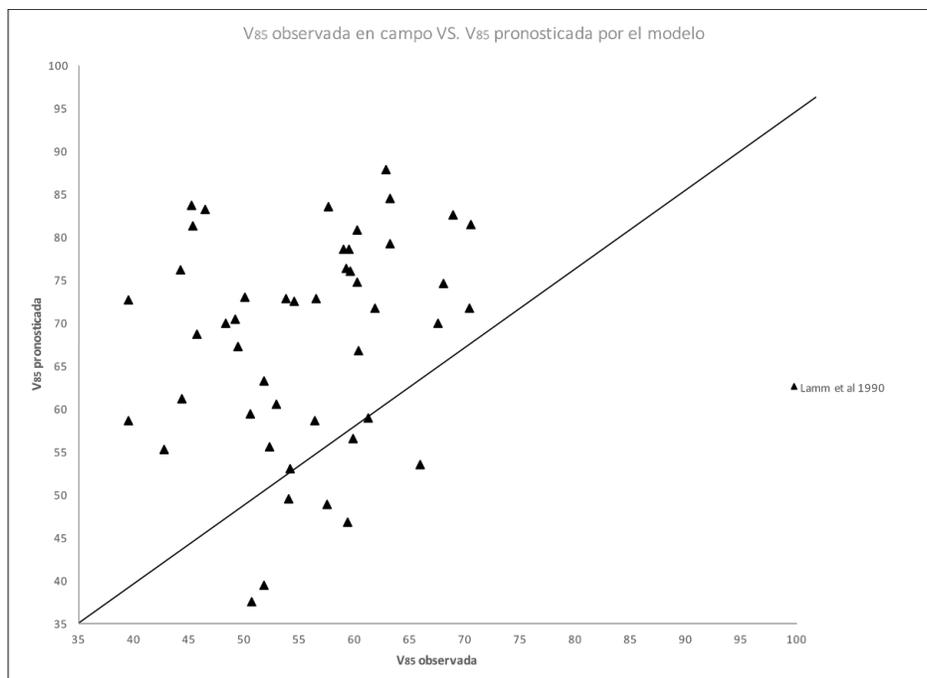


Figura 23. Gráfica V85 Modelo Lamm et al (1999).

Fuente: Elaboración Propia

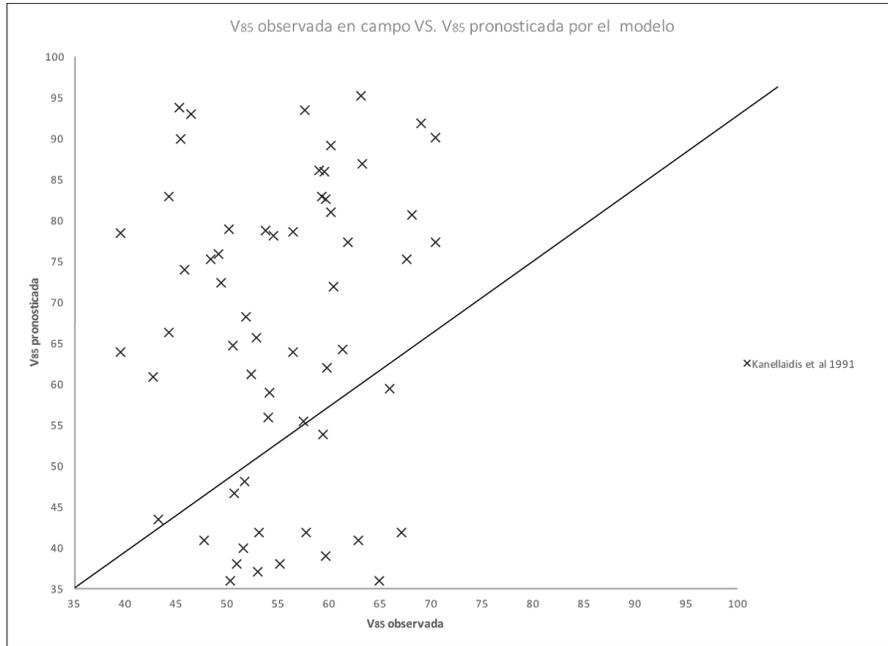


Figura 24. Gráfica V85 Modelo Kanellaidis et al (1990)

Fuente: Elaboración Propia

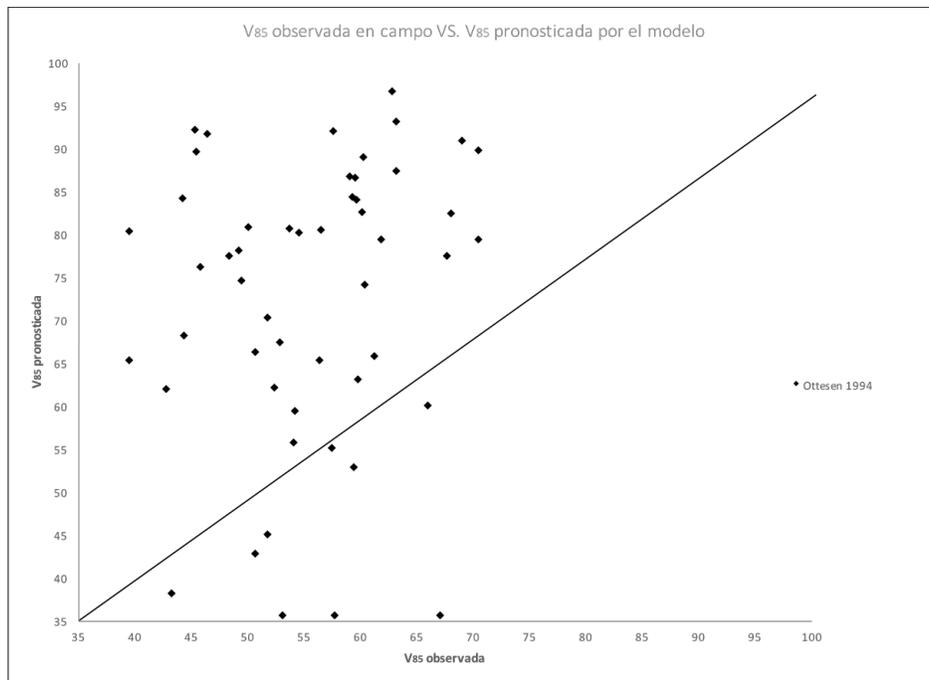


Figura 25. Gráfica V85 Modelo Ottesem

Fuente: Elaboración Propia

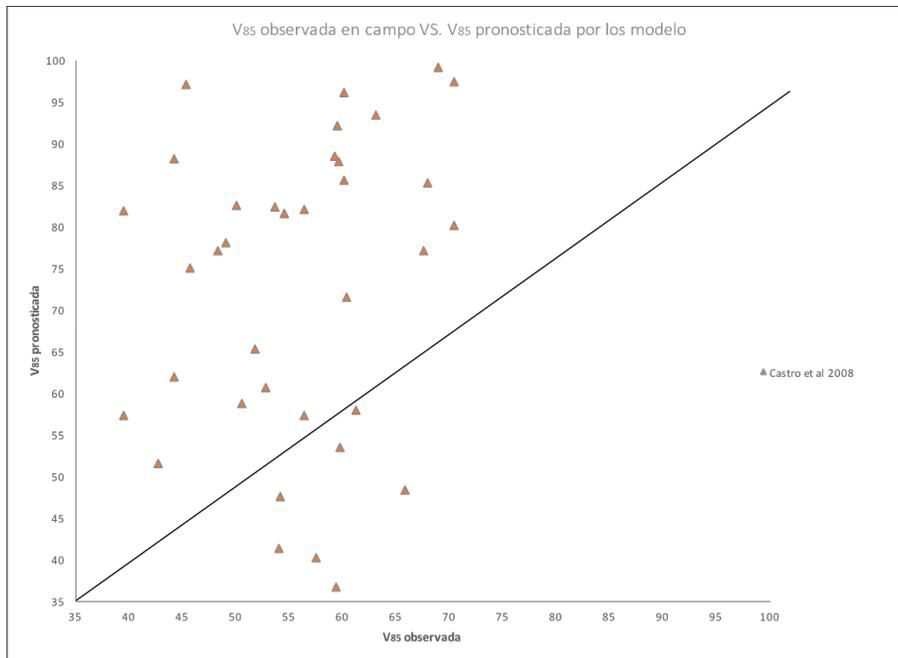


Figura 26. Gráfica V85 Modelo Castro et al

Fuente: Elaboración Propia

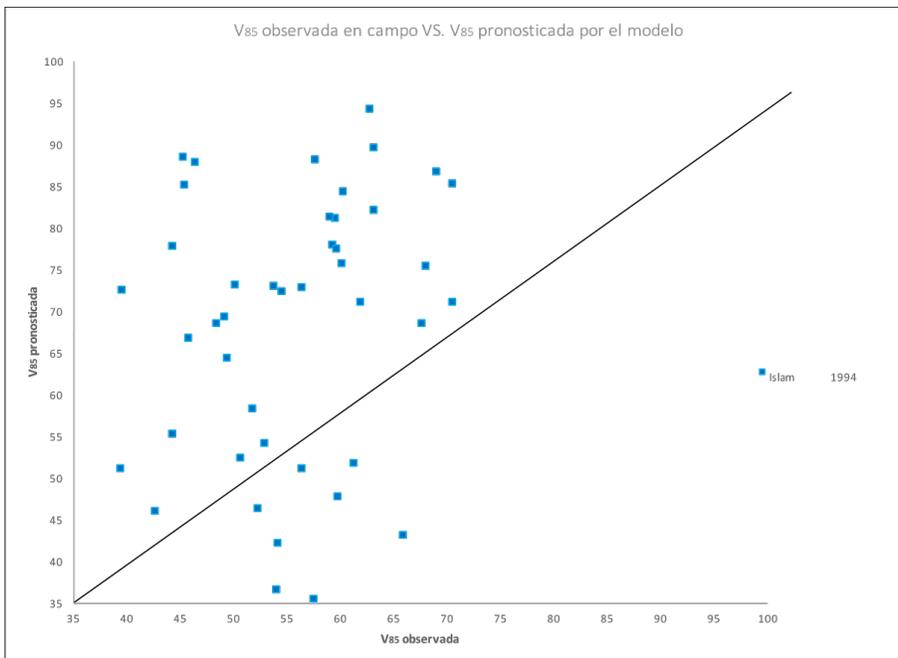


Figura 27. Gráfica V85 Modelo Islam

Fuente: Elaboración Propia

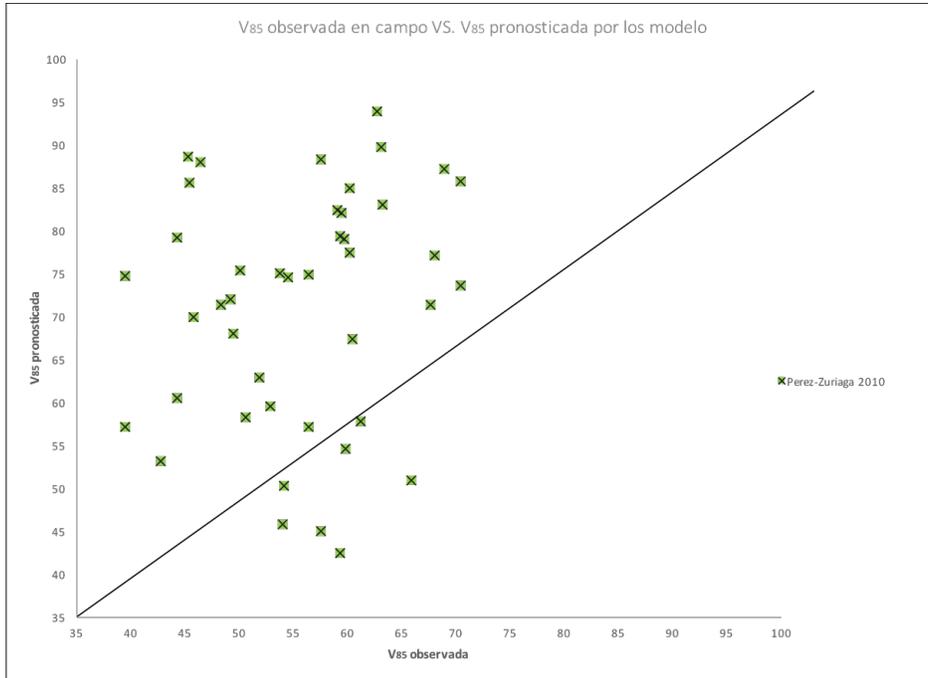


Figura 28. Gráfica V85 Modelo Perez-Zuriaga

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31.

Datos de los modelos existentes para el cálculo de la V_{85}

No. Curva	Abscisa	Radio	Velocidad 85 en campo	McLean 1981	Glennon et al 1986	Lamm et al 1988	Kanellaidis et al 1990	Ottesen 1993	Islam 1994	Castro et al 2008	Perez-Zuriaga 2010
1	70,25	133	49,14	80,67	69,94	70,42	75,85	78,07	69,32	78,08	72,05
2	213,64	148	53,72	82,75	73,39	72,85	78,66	80,66	72,92	82,34	75,09
3	1057,55	124	45,75	79,18	67,47	68,68	73,92	76,21	66,71	75,03	69,87
4	1204,33	82	42,71	67,71	48,46	55,29	60,87	61,93	45,90	51,51	53,10
5	1275,30	283	46,43	91,57	88,00	83,15	92,87	91,64	87,73	100,41	87,97
6	1348,59	175	44,25	85,60	78,11	76,18	82,78	84,21	77,79	88,19	79,25
7	1539,52	149	50,09	82,88	73,59	73,00	78,83	80,82	73,13	82,60	75,27
8	2357,75	209	63,17	88,14	82,31	79,14	86,78	87,37	82,05	93,38	82,96
9	2471,40	200	59,49	87,55	81,34	78,45	85,82	86,64	81,07	92,18	82,10
10	2689,12	78	65,92	66,20	45,95	53,52	59,33	60,04	43,06	48,41	50,89
11	2806,07	160	68,04	84,14	75,68	74,47	80,62	82,39	75,30	85,18	77,11
12	2956,48	162	60,17	84,35	76,03	74,71	80,92	82,65	75,66	85,61	77,42
13	3075,15	176	59,26	85,69	78,25	76,28	82,91	84,32	77,94	88,36	79,38
14	3283,78	94	52,85	72,16	55,82	60,48	65,61	67,46	54,11	60,62	59,60
15	3414,01	130	48,36	80,20	69,15	69,87	75,23	77,48	68,49	77,11	71,35
16	3524,38	30	41,19	10,20			16,12				
17	3625,50	52	43,24	48,70	16,94	33,08	43,47	38,24	8,56	12,53	25,31
18	3893,64	46	50,91	41,85	5,59	25,08	38,01	29,71			15,30
19	3975,94	45	53,00	40,53	3,41	23,54	36,99	28,07			13,38
20	4099,01	40	59,43	32,95		14,68	31,36	18,62			
21	4188,29	84	59,79	68,70	50,09	56,44	61,89	63,16	47,74	53,53	54,54
22	4268,23	35	60,46	23,20			24,56				
23	4353,66	89	56,37	70,53	53,12	58,57	63,83	65,43	51,12	57,28	57,21
24	4617,30	291	57,59	91,82	88,41	83,44	93,35	91,95	88,13	100,93	88,34
25	4720,25	50	57,74	46,60	13,46	30,62	41,76	35,63			22,24
26	4880,94	487	62,77	95,59	94,67	87,85	101,64	96,66	94,23	108,67	93,85
27	4920,25	50	67,06	46,60	13,46	30,62	41,76	35,63	4,22	8,23	22,24
28	5037,17	245	70,46	90,06	85,49	81,38	90,07	89,76	85,24	97,32	85,76
29	5171,56	130	67,59	80,20	69,15	69,87	75,23	77,48	68,49	77,11	71,35
30	5284,86	267	68,96	90,98	87,01	82,46	91,75	90,90	86,75	99,20	87,10
31	5356,20	140	70,45	81,70	71,64	71,62	77,22	79,35	71,10	80,18	73,55
32	5416,32	90	61,25	70,87	53,68	58,97	64,20	65,85	51,75	57,97	57,71
33	5492,82	145	54,56	82,37	72,75	72,41	78,13	80,19	72,26	81,56	74,53
34	5616,71	242	45,39	89,92	85,26	81,22	89,83	89,59	85,01	97,03	85,56
35	5824,09	298	45,26	92,04	88,78	83,70	93,78	92,23	88,49	101,38	88,66
36	5910,61	96	44,29	72,76	56,83	61,18	66,29	68,22	55,22	61,86	60,48
37	5987,35	91	50,60	71,20	54,24	59,36	64,56	66,27	52,36	58,66	58,20
38	6055,44	173	59,64	85,42	77,80	75,97	82,51	83,98	77,48	87,81	78,98
39	6111,61	49	62,82	45,49	11,61	29,32	40,87	34,24			20,61
40	6168,90	67	59,35	60,45	36,42	46,81	53,76	52,88	32,06	36,63	42,49
41	6258,10	35	47,97	23,20			24,56				
42	6328,00	30	45,74	10,20			16,12				
43	6393,01	48	51,53	44,33	9,69	27,97	39,94	32,79			18,92
44	6486,74	77	54,16	65,75	45,19	52,99	58,87	59,47	42,20	47,48	50,23
45	6565,75	71	54,01	62,75	40,23	49,49	55,93	55,74	36,49	41,33	45,85
46	6737,73	233	60,21	89,48	84,54	80,71	89,06	89,04	84,29	96,14	84,92
47	6854,73	102	51,80	74,44	59,60	63,14	68,18	70,30	58,25	65,29	62,93
48	6953,39	147	56,45	82,63	73,18	72,71	78,49	80,51	72,71	82,09	74,90
49	7230,33	140	61,87	81,70	71,64	71,62	77,22	79,35	71,10		
50	7431,56	322	63,14	92,72	89,91	84,50	95,16	93,08	89,61	102,78	89,66
51	7782,72	117	49,44	77,87	65,29	67,14	72,27	74,57	64,38		67,94
52	7893,02	202	58,99	87,69	81,56	78,61	86,04	86,80	81,30		82,29
53	7955,19	82	52,29	67,91	48,78	55,51	61,07	62,17	46,26		
54	8041,42	33	50,01	18,47			21,41				
55	8125,26	58	51,74	54,13	25,94	39,42	48,06	45,01	19,59		
56	8255,67	50	53,07	46,60	13,46	30,62	41,76	35,63			22,24
57	8464,93	44	50,23	39,15	1,12	21,93	35,94	26,35			11,36
58	8599,24	43	50,68	37,71		20,24	34,86	24,55			9,25
59	8688,20	33	48,17	18,47			21,41				
60	8785,74	27	51,59	0,09			9,96				
61	8890,31	49	47,68	45,49	11,61	29,32	40,87	34,24	1,89		20,61
62	8957,15	56	50,62	52,45	23,16	37,46	46,61	42,91	16,20	20,22	30,79
63	9050,52	70	57,48	62,20	39,32	48,85	55,41	55,06	35,44	40,21	45,04
64	9127,24	47	59,63	43,11	7,68	26,55	38,99	31,28			17,15
65	9195,37	46	55,11	41,85	5,59	25,08	38,01	29,71			15,30
66	9249,55	115	60,39	77,46	64,61	66,67	71,78	74,07		71,49	67,35
67	9367,92	44	64,94	39,15	1,12	21,93	35,94	26,35			11,36
68	9794,90	146	39,49	82,50	72,97	72,56	78,31	80,35	72,49	81,83	74,72
69	9859,79	89	39,46	70,53	53,12	58,57	63,83	65,43	51,12	57,28	57,21

Fuente: Elaboración Propia

Algunos datos se eliminaron de esta tabla ya que se encuentran fuera del rango de aplicación del modelo.

Al aplicar estos modelos al tramo de la vía en estudio, se encuentra que ninguno es óptimo para llevar a cabo la investigación, ya que los datos se encuentran muy por encima o por debajo de la recta de pendiente 1. Por lo tanto, se pretende encontrar un modelo que sea capaz de mostrar concordancia con los datos obtenidos. A continuación se describe el análisis estadístico que se realizó.

5.3.1 Análisis de regresión múltiple del modelo para calcular la velocidad de operación V_{85} . Los parámetros a tener en cuenta para realizar la regresión múltiple son los siguientes:

Variable dependiente: V_{85}

Variables independientes:

- $1/\Delta$
- $1/L_a$
- $1/L_T$
- $1/P$
- $1/R_a$
- $1/R_c$
- $1/R_T$

La localización de estos parámetros se puede observar en la siguiente gráfica:

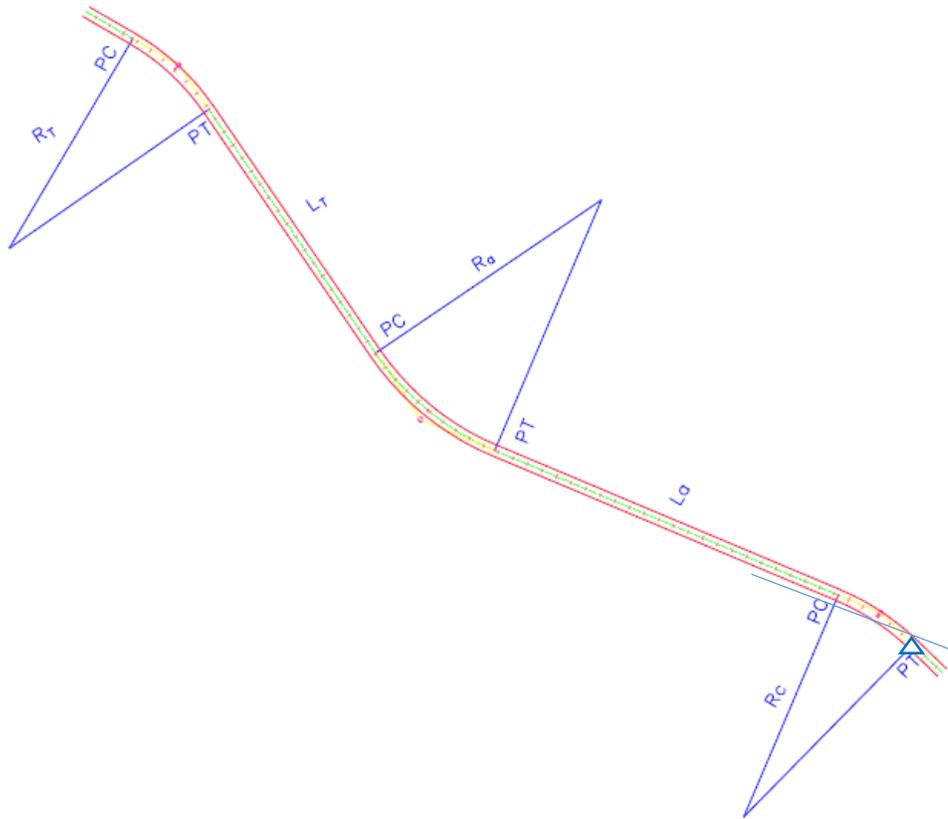


Figura 29. Parámetros para la regresión múltiple.

Fuente: Elaboración Propia

Igualmente los datos con los cuales se realizó el análisis de la regresión múltiple se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 32.

Valores numéricos de los parámetros en la regresión múltiple.

# Curva	V85 Km/h	Rc m	La km	Ra m	LT km	RT m	Delta (Δ) °	Pendiente(P) %
1	49,86	133	0,04986				27,7891	-7,792
2	63,87	148	0,06387				16,0113	-7,792
3	55,57	124	0,05557	148	0,06387	133	30,7759	1,626
4	57,03	82	0,05703	124	0,05557	148	17,2859	1,626
5	56,17	283	0,05617	82	0,05703	124	23,7219	1,626
6	54,29	175	0,05429	283	0,05617	82	9,5663	2,500
7	51,21	149	0,05121	175	0,05429	283	25,5779	2,500
8	59,02	209	0,05902	149	0,05121	175	6,3441	2,500
9	59,54	200	0,05954	209	0,05902	149	21,5977	2,500
10	56,16	78	0,05616	200	0,05954	209	14,4888	3,125
11	56,06	160	0,05606	78	0,05616	200	29,7941	3,125
12	50,31	162	0,05031	160	0,05606	78	25,9253	3,125
13	51,62	176	0,05162	162	0,05031	160	18,8971	2,597
14	53,04	94	0,05304	176	0,05162	162	62,7364	2,597
15	51,04	130	0,05104	94	0,05304	176	33,3708	3,941
16	43,21	30	0,04321	130	0,05104	94	107,1215	3,941
17	45,33	52	0,04533	30	0,04321	130	83,1879	3,941
18	52,37	46	0,05237	52	0,04533	30	69,8299	3,941
19	44,83	45	0,04483	46	0,05237	52	74,4883	3,941
20	43,73	40	0,04373	45	0,04483	46	137,8557	3,941
21	46,98	84	0,04698	40	0,04373	45	26,0387	7,167
22	47,51	35	0,04751	84	0,04698	40	58,7164	7,167
23	49,28	89	0,04928	35	0,04751	84	66,3533	7,167
24	63,26	291	0,06326	89	0,04928	35	38,8341	7,167
25	61,89	50	0,06189	291	0,06326	89	88,4821	7,167
26	63,08	487	0,06308	50	0,06189	291	23,3346	7,167
27	63,44	50	0,06344	487	0,06308	50	95,3020	7,167
28	64,41	245	0,06441	50	0,06344	487	8,3077	2,692
29	59,71	130	0,05971	245	0,06441	50	29,4492	2,692
30	55,84	267	0,05584	130	0,05971	245	24,0052	2,692
31	53,30	140	0,05330	267	0,05584	130	71,4284	2,692
32	50,67	90	0,05067	140	0,05330	267	56,0610	8,491
33	53,43	145	0,05343	90	0,05067	140	15,4490	8,491

Tabla 32. Continúa...

34	62,81	242	0,06281	145	0,05343	90	13,7194	8,491
35	66,19	298	0,06619	242	0,06281	145	5,6228	8,491
36	56,79	96	0,05679	298	0,06619	242	38,5696	8,491
37	52,76	91	0,05276	96	0,05679	298	31,2556	8,491
38	52,04	173	0,05204	91	0,05276	96	14,7949	8,491
39	47,28	49	0,04728	173	0,05204	91	37,1957	8,491
40	44,86	67	0,04486	49	0,04728	173	40,5282	8,491
41	40,48	35	0,04048	67	0,04486	49	113,2672	8,491
42	39,00	30	0,03900	35	0,04048	67	53,7852	8,491
43	44,54	48	0,04454	30	0,03900	35	79,7529	8,491
44	50,52	77	0,05052	48	0,04454	30	44,0986	8,491
45	49,60	71	0,04960	77	0,05052	48	39,4800	8,491
46	54,00	233	0,05400	71	0,04960	77	27,4811	8,491
47	53,75	102	0,05375	233	0,05400	71	29,1713	8,491
48	51,19	147	0,05119	102	0,05375	233	34,5339	8,491
49	53,77	140	0,05377	147	0,05119	102	48,1961	8,491
50	54,38	322	0,05438	140	0,05377	147	34,3075	8,491
51	50,15	117	0,05015	322	0,05438	140	26,6264	8,491
52	52,25	202	0,05225	117	0,05015	322	5,1462	8,491
53	48,60	82	0,04860	202	0,05225	117	65,6957	8,491
54	40,24	33	0,04024	82	0,04860	202	31,3031	-0,335
55	40,66	58	0,04066	33	0,04024	82	70,8904	-0,335
56	40,47	50	0,04047	58	0,04066	33	100,5211	10,606
57	40,01	44	0,04001	50	0,04047	58	148,1208	10,606
58	40,69	43	0,04069	44	0,04001	50	17,8580	10,606
59	42,86	33	0,04286	43	0,04069	44	80,2385	10,606
60	39,07	27	0,03907	33	0,04286	43	124,3717	10,606
61	41,79	49	0,04179	27	0,03907	33	89,2139	10,606
62	45,06	56	0,04506	49	0,04179	27	25,0229	10,606
63	43,77	70	0,04377	56	0,04506	49	37,2377	10,606
64	44,08	47	0,04408	70	0,04377	56	69,6327	1,351
65	45,07	46	0,04507	47	0,04408	70	48,8473	1,351
66	49,40	115	0,04940	46	0,04507	47	9,5622	1,351
67	49,63	44	0,04963	115	0,04940	46	17,9601	1,351
68	50,73	146	0,05073	44	0,04963	115	22,8901	1,351
69	51,46	89	0,05146	146	0,05073	44	11,8567	1,351

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos son los siguientes

Tabla 33.

Valores arrojados en la regresión

Parámetro	Suma de cuadrados	Error standard	T estadístico	P-valor
CONSTANTE	104,331	1,28559	81,1548	0,0000
1/Δ	6,81253	3,31485	2,05515	0,0442
1/La	-2,75691	0,075081	-36,7192	0,0000
1/P	-0,593606	0,199499	-2,97548	0,0042
1/Ra	34,8697	15,9762	2,1826	0,0329
1/Rc	80,8153	20,4015	3,96123	0,0002

Fuente: Elaboración Propia

Análisis de varianza

Tabla 34.

Valores de la varianza.

Procedencia	Suma de cuadrados	Df	Media cuadrática	F-Ratio	P-valor
Modelo	3144,96	5	628,991	772,1700	0,0000
Residual	49,6889	61	0,814572		
Total(corr)	3194,65	66			

Fuente: Elaboración Propia

$R^2 = 98,45$ porciento

R^2 (ajustado por d.f.) = **98,32** porciento

Error estándar de la estimación = 0,90

Error medio absoluto = 0,67

Estadístico Durbin-Watson = 1,10853 (P = 0,0000)

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,442239

Regresión paso a paso: Método de selección hacia adelante

P para entrar: 0,05

P para remover: 0,05

Paso 0:

0 variables en el modelo. 66 d.f. por error.

$R^2 = 0,00\%$ Ajustado = 0,00% MSE = 48,4037

Paso 1:

Añadiendo variable 1/La con Probabilidad de entrada = 0

Una variable en el modelo. 65 d.f. por error.

$R^2 = 97,72\%$ Ajustado = 97,69% MSE = 1,11915

Paso 2:

Añadiendo variable 1/Rc con Probabilidad de entrada = 0,00377865

Dos variables en el modelo. 64 d.f. por error.

$R^2 = 98,00\%$ Ajustado = 97,94% MSE = 0,996016

Paso 3:

Añadiendo variable 1/P con Probabilidad de entrada = 0,00770558

Tres variables en el modelo. 63 d.f. por error.

$R^2 = 98,22\%$ Ajustado = 98,13% MSE = 0,903172

Paso 4:

Añadiendo variable 1/Ra con Probabilidad de entrada = 0,0400228

Cuatro variables en el modelo. 62 d.f. por error.

$$R^2 = 98,34\% \text{ Ajustado} = 98,23\% \text{ MSE} = 0,856925$$

Paso 5:

Añadiendo variable 1/Delta con Probabilidad de entrada = 0,0441532

Cinco variables en el modelo. 61 d.f. por error.

$$R^2 = 98,44\% \text{ Ajustado} = 98,32\% \text{ MSE} = 0,814572$$

Modelo seleccionado

Se muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la velocidad del percentil 85 (V85) y siete (7) variables geométricas del tramo de carretera estudiado.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$V_{85} = 104,331 + 6,81253 * \frac{1}{\Delta} - 2,75691 * \frac{1}{L_a} - 0,593606 * \frac{1}{P} + 34,8697 * \frac{1}{R_a} + 80,8153 * \frac{1}{R_c}$$

Como el P-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,05, existe relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R^2 indica que el modelo explica el 98,44% la variabilidad de la velocidad V_{85} . El R^2 ajustado, más adecuado para

comparar modelos con diferente número de variables independientes, es igual al **98,32%**, un nivel alto de predicción, como corresponde a un modelo predictivo con buen ajuste.

El error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,902536. Este valor puede usarse para construir límites de predicción en el caso de nuevas observaciones. El error absoluto medio (MAE) de 0,668224, es el valor promedio de los residuos y, el estadístico Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si existe alguna correlación significativa en función del orden en que se producen los datos. Dado que el P-valor es menor a 0,05, hay indicación de posible correlación con un 95% de nivel de confianza.

Para determinar si el modelo se puede simplificar; el P-valor más alto en las variables independientes estudiadas es de 0,0442 y, este valor corresponde a la variable $1/\Delta$. Como el P-valor es inferior a 0,05, este término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. En consecuencia, no se debe eliminar ninguna variable del modelo encontrado.

La siguiente figura muestra la gráfica de la velocidad de operación V_{85} en función de los parámetros mencionados anteriormente, los cuales proporcionan la velocidad V_{85} en el modelo:

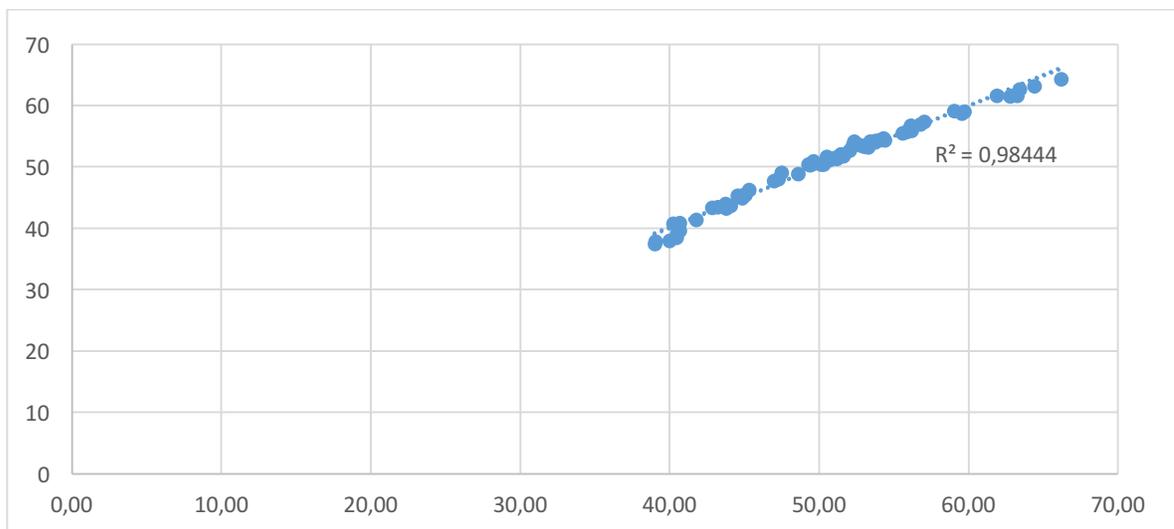


Figura 30. Gráfica de la V_{85} en campo vs V_{85} en modelo

Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica se observa un alto grado de concordancia entre la velocidad de operación V_{85} medida en campo y la velocidad de operación V_{85} obtenida en el modelo con los parámetros geométricos empleados.

6. Conclusiones

- Para realizar el diseño geométrico de una vía es necesario determinar características como: ancho de calzada, ancho de berma, radio, longitud de la curva, pendiente, peralte, ángulo de deflexión, longitud de la entretangencia, entre otras y algunos de estos parámetros son importantes para el análisis de la consistencia en la vía, en la realización de este proyecto cobraron vital importancia los siguientes parámetros geométricos: radio, pendiente, ángulo de deflexión, entretangencia, los cuales permitieron encontrar un modelo para calcular la velocidad de operación V_{85} .

- Para la elaboración de los perfiles de velocidad existen diferentes metodologías las cuales son bastantes laboriosas y extensas, pero con el avance tecnológico se han desarrollado equipos que proporcionan estos perfiles, en nuestro caso se utilizó el equipo Video VBox el cual proporciona datos continuos de velocidad y con el software del equipo se obtiene los perfiles de velocidad de una forma más precisa y en tiempo real, mostrando además que es una mejor metodología que las utilizadas anteriormente por otros trabajos, lo que proporciona un análisis de consistencia mucho más exacto.

- El cálculo de la velocidad de operación V_{85} puede realizarse a través de hojas de cálculo o utilizando software matemáticos. Al utilizar Excel el proceso se hace poco práctico y demorado, lo cual no es adecuado teniendo a la mano otras herramientas mucho más eficaces. En el desarrollo de este trabajo se utilizó el software Wolfram Mathematica, el cual permitió realizar los cálculos de velocidad de operación V_{85} de una manera más eficiente y más rápida.

- Se encontró una diferencia promedio de 10 Km/h entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño en las curvas horizontales, lo cual es una diferencia bastante aceptable por la

norma de nuestro país y según el criterio I de Lamm se puede concluir que el tramo de la vía en estudio tiene una consistencia buena.

- Teniendo en cuenta algunos parámetros geométricos del tramo de vía estudiado, se realizó un ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple, el cual arrojó el comportamiento de la velocidad de operación V_{85} en función de las variables geométricas de la vía. La ecuación dada por el modelo es:

$$V_{85} = 104,331 + 6,81253 * \frac{1}{\Delta} - 2,75691 * \frac{1}{L_a} - 0,593606 * \frac{1}{P} + 34,8697 * \frac{1}{R_a} \\ + 80,8153 * \frac{1}{R_c}$$

- Al realizar el análisis de cada una de las características geométricas por separado se encuentra que la variable que más influye en el cálculo de la velocidad de operación V_{85} es la longitud entretangencia anterior a la curva, lo cual implica que a mayor longitud de esta entretangencia la vía será más consistente.

- El análisis de consistencia de la vía se basó en el criterio I y el criterio II de Lamm et al, encontrándose en el primer criterio que el 97% de la vía en los dos sentidos del tramo presenta una consistencia buena y solo el 3% tiene una consistencia pobre, en donde es posible tener una mayor accidentalidad. La tabla que muestra las curvas con mayor probabilidad de accidentalidad se muestra a continuación:

Tabla 35.

Curvas de mayor Accidentalidad según criterio I de Lamm et al sentido Curos-Lomas del Viento

No. Curva	Abscisa	Velocidad Operación Vo	Velocidad de Diseño Vd	Diferencia Vo-Vd 	Radio (m)
68	9794,9	39,49	60	20,51	146
69	9859,79	39,46	60	20,54	89

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36.

Curvas de mayor accidentalidad según criterio I de Lamm et al, sentido Lomas del Viento- Curos

No. Curva	Abscisa	Velocidad Operación Vo	Velocidad de Diseño Vd	Diferencia Vo-Vd 	Radio (m)
42	6328	39	60	21	30
60	8785,74	39,07	60	20,93	27

Fuente: Elaboración Propia

- Aplicando el criterio II de Lamm se encontró que el tramo en estudio presenta una gran consistencia, lo cual significa que la velocidad de operación entre curvas consecutivas es buena, es decir no se presentan cambios bruscos de velocidad entre curvas sucesivas. Para el sentido Curos – Lomas del Viento solo el 1% puede presentar una alta accidentalidad basados en el concepto de consistencia pobre, ya que en estas curvas se presenta el cambio brusco de velocidad lo cual puede sorprender a los conductores y llevarlos a cometer una imprudencia. En el sentido Lomas del Viento – Curos el 97% de las curvas presenta una consistencia buena y el 3% consistencia aceptable y ninguna presenta consistencia pobre, lo cual indica que este sentido no se presenta curvas con un cambio brusco de velocidad haciendo que la vía sea consistente.

En base a lo anterior se puede decir que el tramo de la vía en estudio presenta un diseño geométrico que cumple con las expectativas de los conductores cuando ésta es transitada con una velocidad acorde a la asignada por el diseñador geométrico de carreteras.

7. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones se recomienda hacer una comparación entre las curvas de consistencia pobre con la accidentalidad en esa curva, para esto se debe contar con el apoyo de la Policía Nacional de Carreteras para obtener estos registros de accidentes, en este trabajo no se analizaron puesto que no era uno de sus objetivos.
- Complementar con otros sistemas de toma de datos, como por ejemplo, el radar, para contrastar los datos arrojados por un equipo u otro y así poder tener una mayor confiabilidad en las predicciones del grado de consistencia de una vía.
- Tener en cuenta otros parámetros de la vía para el análisis de consistencia, tales como, peralte, pendiente y el estado de la superficie de rodadura, ya que estos son importantes para que el conductor tenga un buen desempeño durante su recorrido.
- Este trabajo puede ampliarse para realizar un análisis de la consistencia de las vías que se encuentran ubicadas en los diferentes tipos de topografía que tiene el país como son: plano, ondulado, montañoso y escarpado.

Referencias Bibliográficas

- Abdul-Mawjoud, A., & Sofía, G. (2008). *Development of models for predicting speed on horizontal curves for two-lane rural highways*. Arabian: Arabian Journal for Science and Engineering, 33(2), 365. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.631.7277&rep=rep1&type=pdf>
- Altamira, A. L., Marcet, J. E., Graffigna, A. B., & Gómez, A. M. (2010). *Assessing available sight distance: an indirect tool to evaluate geometric design consistency*. Valencia, España: In Proceedings of 4th International Symposium on Highway Geometric Design.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2004). *A policy on geometric design of highway and streets*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Andueza, P. (2000). *Mathematical models of vehicular speed on mountain roads*. Venezuela: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1701), 104-110.
- Bevilacqua, A., Di Mino, G., & Nigrelli, J. (2004). *An experimental investigation on the relationship between speed and road geometry*. Florencia Italia: Proc. del II Congreso Internacional SIIV Nuevas tecnologías y modelos de peajes para carreteras.
- Cafiso, S., Di Graziano, A., La Cava, G., Lamm, R., & Heger, R. (2004). *In-field data collection for driving behavior analysis using the DIVAS instrumented car*. Florence, Italy: In 14th International Congress of the Italian Society of Highway Infrastructure.
- Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungría, J. M., & García-García, A. (2012). *New geometric design consistency model based on operating speed profiles for*

- road safety evaluation*. Accident Analysis & Prevention, 61, 33-42. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457512003570>
- Cardoso, J., De Macedo, A. L., Kanellaidis, G., Flouda, A., Dimitropoulos, I., Peltola, H., & Dupre, G. (1998). *Improvements of models on the relations between speed and road characteristics*. Lisboa, Portugal: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. SAFESTAR Task, 5.
- Castro, M., Iglesias, L., Rodriguez-Solano, R., & Sanchez, J. A. (2008). *Highway safety analysis using geographic information systems*. Escocia : In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport (Vol. 161, No. 2, pp. 91-97). Thomas Telford Ltd.
- Castro, M., Pardillo-Mayora, J., & Sánchez, J. (2005). *Alignment indices as a tool to evaluate safety and design consistency in two lane rural roads*. Chicago: In 3rd International Symposium on Highway Geometric Design.
- Castro, M., Sánchez, J. A., M., V. C., Iglesias, L., & Rodríguez-Solano, R. (2008). *Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation*. Madrid, España: Journal of Computing in Civil Engineering, 22(5), 325-331.
- Castro, M., Sánchez, J. F., Sánchez, J. A., & Iglesias, L. (2009). *Operating speed and speed differential for highway design consistency*. Journal of transportation engineering, 137(11), 837-840.
- Colombia, Ministerio de Transporte; Instituto Nacional de Vías. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Obtenido de Artemisa UniCauca: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~carboled/Libros/Manual%20de%20Diseno%20Geometrico%20de%20Carreteras.pdf>

- Crisman, B., Marchionna, A., Perco, P., & Roberti, R. (2005). *Operating speed prediction model for two-lane rural roads*. Chicago: 3rd International Symposium on Highway Geometric Design.
- De Waard, D. (2002). *Mental workload*, In Fuller, R and Santos, J. Pergamon, Amsterdam: Human factors for highway engineering, 161-176. 1st Ed.
- Dell'Acqua, G., & Russo, F. (2010). *Speed factors on low-volume roads for horizontal curves and tangents*. Baltic Journal of Road & Bridge Engineering, 5(2).
- Elvik, R. (2013). *A before-after study of the effects on safety of environmental speed limits in the city of Oslo, Norway*. Oslo, Noruega: Safety Science, 55, 10-16.
- Findley, D. J., Hummer, J. E., Rasdorf, W., Zegeer, C. V., & Fowler, T. J. (2012). *Modeling the impact of spatial relationships on horizontal curve safety*. United States: Accident Analysis & Prevention, 45, 296-304.
- Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., . . . Passetti, K. (2000). *Speed prediction for two-lane rural highways*. Arlington, TX United States : Texas A&M University System; Federal Highway Administration.
- Gambard, J. M., & Louah, G. (1986). *Vitesses pratiquées et géométrie de la route*. Paris, Francia: Techniques des Routes et Autoroute - SETRA DLI.
- García Ramírez, Y. D. (2014). *Aceleraciones y desaceleraciones de vehículos livianos en camino de montaña*. San Juan: Universidad Nacional de San Juan, Tesis Doctoral.
- García, A., Camacho, F. J., & Pérez, A. M. (2011). *Estudio de la transición de tangente a curva en carreteras rurales de dos vías con perfiles de velocidad continua*. Madrid: Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC).

- Gibreel, G. M., Easa, S. M., & El-Dimeery, I. A. (2001). *Prediction of operating speed on three-dimensional highway alignments*. Journal of Transportation Engineering, 127(1), 21-30.
- Glennon, J. C., Neuman, T. R., & Leisch, J. E. (1986). *Safety and operational considerations for design of rural highway curves*. Washington D.C.: Federal Highway Administration. Rep. No. FHWA/RD-86/035, .
- Hallmark, S., Smadi, O., & Hawkins, N. (2013). *Speed Reduction Impacts of Dynamic Speed Feedback Signs on Rural Two Lane Curves*. Washington DC, Estados Unidos: Transportation Research Board.
- Hassan, Y., Gibreel, G., & Easa, S. M. (2000). *Evaluation of highway consistency and safety: Practical application*. Canadá: Journal of transportation engineering, 126(3), 193-201.
- Heger, R. (1995). *Driving behavior and driver mental workload as criteria for highwaygeometric design quality*. Boston: International Symposium on Highway Geometric Design Practices. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/EC003/ch43.pdf>
- Islam, M., & Seneviratne, P. (1994). *Evaluation of design consistency of two-lane highways*. San Diego: Institute of Transportation Engineers Journal, 64(2), 28-31.
- Kanellaidis, G., Golias, J., & Efstathiadis, S. (1990). *Driver's speed behaviour on rural road curves*. *Traffic Engineering and Control*. Atenas, Grecia: Traffic Engineering and Control, 31(7-8), 414-415.
- Krammes, R., & Glascock, S. (1992). *Geometric inconsistencies and accident experience on two-lane rural highways*. Washington, DC : Transportation Research Record, (1356).
- Krammes, R., Rao, K., & Oh, H. (1995). *Highway geometric design consistency evaluation software*. Washington, DC: Transportation Research Record.

- Lamm, R., & Choueiri, E. (1987). *Recommendations for evaluating horizontal design consistency based on investigations in the State of New York*. New York: Transportation Research Record, 1122(68), e78. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1987/1122/1122-008.pdf>
- Lamm, R., Beck, A., Ruscher, T., Mailaender, T., Cafiso, S., La Cava, G., & Matthews, W. (2007). *How to make two-lane rural roads safer*. Southampton, Inglaterra: Scientific background and guide for practical application. WIT-Press, Southampton.
- Lamm, R., Choueiri, E., Hayward, J. C., & Paluri, A. (1988). *Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads*. New York: Transportation Research Record, 1195, 111. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1988/1195/1195-011.pdf>
- Lamm, R., Guenther, A., & Choueiri, E. (1995). *Safety module for highway geometric design*. Transportation Research Record, 1512(9), 7-15. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1995/1512/1512-002.pdf>
- Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. Nueva York, NY Estados Unidos: McGraw-Hill.
- McFadden, J., & Elefteriadou, L. (1997). *Formulation and validation of operating speedbased models using bootstrapping*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1579), 97-103.
- McFadden, J., & Elefteriadou, L. (2000). *Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highways: Development of new procedur*. Washington, DC: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1737), 9-17.

- McLean, J. R. (1978). *Speeds on curves: Regression analysis*. Australia: Australian Road Research Board (ARRB): AIR 200-3.
- Messer, C. (1980). *Methodology for evaluating geometric design consistency*. Washington : Transportation Research Board; National Academy of Sciences.
- Misaghi, P., & Hassan, Y. (2005). *Modelling operating speed and speed differential on two-lane rural roads*. Canadá: Journal of Transportation Engineering, 131(6), 408-418.
- Morrall, J. F. (1994). *Side friction demanded and margins of safety on horizontal curves*. Canada: Transportation Research Record, 1435, 145. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1435/1435-019.pdf>
- Ng, J., & Sayed, T. (2004). *Effect of Geometric Design Consistency on Road safety*. Canada: Canadian Journal of Civil Engineering, 31(2), 218-227.
- Nie, B., & Hassan, Y. (2007). *Modeling driver speed behavior on horizontal curves of different road classifications*. Washington, DC United States : Transportation Research Board.
- Ottesen, J., & Krammes, R. (2000). *Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States*. Washington D.C.: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1701), 76-85.
- Passetti, K., & Fambro, D. (1999). *Operating speeds on curves with and without spiral transitions*. Washington D.C.: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1658), 9-16.
- Pérez Z., A., García, A., Torregrosa, F., & D'Attoma, P. (2010). *Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data*. Washington, D.C.: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2171), 11-20.

- Pérez, A. M. (2012). *Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros*. Valencia: [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. .
- Pérez, A. M., Camacho, F. J., & García, A. (2011). *La velocidad de operación y su aplicación en el análisis de la consistencia de carreteras para la mejora de la seguridad vial*. Cuaderno Tecnológico de la Plataforma Tecnológica Española de la Carretera, (6), 64.
- Pico, V. R. (2017). *Definición del modelo de consistencia de velocidad para una carretera rural en el Departamento de Santander a partir de un tramo experimental*. Universidad Pontificia Bolivariana
- Polus, A., & Mattar-Habib, C. (2004). *New Consistency Model for Rural Highways and its Relationship to Safety*. Israel: Journal of transportation engineering, 130(3), 286-293.
- Polus, A., Fitzpatrick, K., & Fambro, D. (2000). *Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1737), 50-57.
- Restrepo, A. (01 de Enero de 2012). *Accidentes de tránsito en Colombia: calles peligrosas*. Obtenido de SURA: <https://www.sura.com/blogs/autos/accidentes-transito-colombia.aspx>
- Richl, L., & Sayed, T. (2005). *Effect of speed prediction models and perceived radius on design consistency*. Canada: Canadian Journal of Civil Engineering, 32(2), 388-399.
- Taragin, A., & Leisch, L. E. (1954). *Driver performance on horizontal curves*. Washington, DC: Highway Research Board Proceedings (Vol. 33).
- Treat, J., Tumbas, N., McDonald, S., Shinar, D., Hume, R., Mayer, R., . . . Castellan, N. (1979). *Tri-level study of the causes of traffic accidents: Final report. Executive summary*. Bloomington, EE.UU.: Institute for Research in Public Safety.

Wooldridge, M., Fitzpatrick, K., Koppa, R., & Bauer, K. (2000). *Effects of horizontal curvature on driver visual demand*. Washington, DC : Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1737), 71-77.