



DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE CURVAS
HORIZONTALES EN CARRETERAS RURALES SOBRE TERRENO
MONTAÑOSO

Autor:

ALEXANDRA ROSAS PALOMINO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES

Popayán, diciembre de 2019

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE CURVAS
HORIZONTALES EN CARRETERAS RURALES SOBRE TERRENO
MONTAÑOSO

Autor:

ALEXANDRA ROSAS PALOMINO

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL
TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES

Director:

PhD. CARLOS ANIBAL CALERO VALENZUELA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES

Popayán, diciembre de 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme ver el sol cada mañana.

A mi papá por heredarme el estudio, a mi madre por enseñarme a vivir

A César y Darianita por su paciencia

A mis compañeros y amigos por su apoyo y colaboración

A Carlos Calero por su orientación permanente.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	¡Error! Marcador no definido.
LISTA DE TABLAS.....	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2 TEMA DE HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4 OBJETIVOS.....	16
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos.....	16
1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 VELOCIDAD DE DISEÑO, OPERACIÓN Y ESPECÍFICA.....	19
2.2 CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO.....	21
2.3 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA CONSISTENCIA DE DISEÑO GEOMÉTRICO.....	23
2.4 ANÁLISIS DE VARIANZA.....	25
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	27
3.1 CLASIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	27
3.2. METODOLOGIA ADOPTADA.....	27
CAPÍTULO 4. RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE DATOS.....	30
4.1 TRABAJO DE CAMPO SELECCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO.....	30
4.2 PROCESAMIENTO DE TOMA DE DATOS.....	34
4.2.1 Recopilación de datos geométricos:.....	34
4.2.2 Recopilación de datos de velocidad.....	36
4.2.3 Definición del tamaño de la muestra.....	40
4.3 PROCESAMIENTO DE LAS VELOCIDADES TOMADAS EN CAMPO.....	41
4.4 GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS.....	44
CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	49
5.1 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE LA DESIGNACIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE UNA CURVA HORIZONTAL, DEFINIDA EN EL MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS DE COLOMBIA.....	49
5.1.1 Procedimiento de asignación de la velocidad específica en el Manual.....	49

5.1.2 Asimilación de la base de datos obtenida al procedimiento de asignación de velocidad específica del manual.	51
5.1.3 Resumen de observación y análisis de los resultados para validación de la Tabla 13	53
5.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE UNA CARRETERA EN TERRENO MONTAÑOSO EN COLOMBIA.....	56
5.3 MODELO ESTADÍSTICO PARA ENCONTRAR LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE UNA CURVA HORIZONTAL EN TERRENO MONTAÑOSO.	65
5.3.1 Combinación de factores que afectan la velocidad en una curva.....	65
5.3.2 Análisis de regresión: Pm vs. Radio, Deflexión.....	66
5.4 PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE UNA CURVA HORIZONTAL EN TERRENO MONTAÑOSO.	69
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la metodología utilizada para la investigación	29
Figura 2. Localización del tramo de estudio Popayán-Totoró-Inzá.	32
Figura 3. Sección transversal típica del tramo de estudio.	33
Figura 4. Resumen de la selección del tramo de estudio.....	33
Figura 5. Diseño en planta y perfil del tramo de estudio – TOPO3	35
Figura 6. Tramo de prueba piloto	37
Figura 7. TPD, año Vs Número de vehículos.....	40
Figura 8. Resumen de la recopilación de datos geométricos y de velocidades	41
Figura 9. Acondicionamiento de la información, coordenadas a Velocidades.	42
Figura 10. Velocidades halladas por interpolación en puntos específicos	43
Figura 11. Perfil de velocidad de dos sujetos, Fuente: elaboración propia sobre TOPO3 .	43
Figura 12. Resumen procesamiento de toma de velocidades	44
Figura 13. Perfiles de velocidad de todos los sujetos por curva. Velocidad kph Vs Abscisa	46
Figura 14. Perfil de velocidad tipo, por curva (Velocidad relativa Vs Distancia relativa)	46
Figura 15. Modelos de perfiles de Velocidad Vel. Relativa % Vs Dist. Relativa %	47
Figura 16. Resumen generación bases de datos.	48
Figura 17. Ejemplo para determinar la velocidad específica.	51
Figura 18. Variación de la velocidad específica (% velocidad Vs Punto de la curva), asimilada a velocidad relativa tomando como referencia la tabla 2.2 del Manual de Diseño Geométrico de Colombia 2008. Fuente: elaboración propia	52
Figura 19. Relación de las variaciones de velocidad obtenidas en campo y según el manual; al iniciar el tramo recto (PTo=Pant), comienzo (PC), punto medio (Pmedio) y terminación de la curva (PT)- VIAS SECUNDARIAS Y TERCIARIAS ($V_D \leq 50$ kph)	53
Figura 20. Relación las variaciones de velocidad obtenidas en campo y según el manual; al iniciar el tramo recto (PTo=Pant), comienzo (PC), punto medio (Pm) y terminación de la curva (PT)- VIAS PRIMARIAS ($V_D \geq 50$ kph).....	53
Figura 21. Variables que se consideraron para análisis de consistencia: (R), (D), (Lc), (Ent ant)	57

Figura 22. Clasificación de los puntos PTant, PC, Pm y PT en una curva específica para un sujeto.....	58
Figura 23. Cálculo de la mediana en un punto en el PC de la curva 8.....	58
Figura 24. Gráfica de dispersión diferencia de velocidad relativa (Pm-PTant) con: (1) Radio, (2) deflexión y (3) con Longitud de la curva.....	60
Figura 25. Gráfica de dispersión diferencia de velocidad relativa (Pm-PTant) con: (4) Entretangente anterior, (5) pendiente longitudinal.	61
Figura 26. Línea de tendencia en el perfil de velocidad del Grupo 1.....	62
Figura 27. Línea de tendencia en el perfil de velocidad del Grupo 2.....	63
Figura 28. Línea de tendencia en el perfil de velocidad del Grupo 3.....	64
Figura 29. Gráficas de regresión de la deflexión y Radio Vs % de velocidad relativa	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Determinación de la velocidad de diseño VD, (INVIAS, 2008).....	20
Tabla 2. Resumen según los autores de la definición de la consistencia del diseño geométrico.....	23
Tabla 3. Resumen de las variables que influyen en la velocidad de operación para determinar la consistencia.....	24
Tabla 4. Escalas de calificación de la consistencia por distintos autores	25
Tabla 5. Definición de los coeficientes de regresión.....	26
Tabla 6. Clasificación del terreno según la geometría de la vía (Terreno montañoso)	31
Tabla 7. Datos geométricos de las curvas horizontales del tramo de estudio.	35
Tabla 8. Métodos utilizados para medir la velocidad de operación	36
Tabla 9 TPD Popayán - El Crucero (Totoró) Estación de conteo 290, INVIAS.....	39
Tabla 10. Determinación del tamaño de la población de la muestra... ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 11. Curvas seleccionadas para el análisis de estudio.....	45
Tabla 12. Formato de la base de datos de análisis del proyecto.....	48
Tabla 13. Asignación de velocidad específica – que se encuentra en la Tabla 2.2 del Manual de diseño Geométrico de Colombia - 2008	50
Tabla 14. Resumen de la comparación de los cambios de la velocidad en cada punto de la curva, para velocidad de diseño MENOR de 50 kph.....	55
Tabla 15. Resumen de la comparación de los cambios de la velocidad en cada punto de la curva, para velocidad de diseño MAYOR de 50 kph.	55
Tabla 16. Valores de velocidad relativa en los puntos de las curvas y diferencia entre esos puntos.....	59
Tabla 17. Valores de los elementos geométricos de las curvas horizontales del grupo 1 ...	62
Tabla 18. Valores de los elementos geométricos de las curvas horizontales del grupo 2 ...	63
Tabla 19. Valores de los elementos geométricos de las curvas horizontales del grupo 3 ...	64
Tabla 20. Resumen de los factores o variables que influyen en la consistencia del diseño.65	
Tabla 21. Combinación de la regresión de las variables: radio, deflexión, longitud de curva y longitud de entretangente Vs Velocidad relativa en el punto medio (Pm – PTant).....	66

Tabla 22. Análisis de Varianza Velocidad relativa PM Vs Radio y Deflexión	67
Tabla 23. Determinación de la velocidad específica relativa (VR%) en la curva de análisis con respecto a la velocidad específica de la curva anterior, en terreno montañoso.....	69
Tabla 24. Comparación de la velocidad relativa en el punto medio Pm observado, utilizando el modelo y mediante el cuadro propuesto.	71

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La seguridad de los usuarios, es un asunto que mide las condiciones de operación de una infraestructura vial y de manera indirecta califica su diseño geométrico. El *International Road Assessment Programme (iRAP)*,¹ define que los criterios de evaluación del proyecto pueden incluir el desempeño de seguridad, además de los usuales como el costo, el tiempo y la calidad. Esa calificación está dada mediante la asignación de estrellas equivalente a la clasificación hotelera. El *iRAP*, estima que una calificación de 3 o más estrellas, ayudará a cumplir el Objetivo de Desarrollo Estratégico (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018), de reducir a la mitad las muertes en accidentes de tránsito y las lesiones graves para el año 2020.

El reporte del estado global de la seguridad en carreteras (ONU, 2018), despliega que el número de muertes, aumentó de 1.25 millones en el año 2013 a 1.35 en el 2016 por accidentes de tránsito; convirtiéndose, en la principal causa de muerte en los niños y jóvenes entre 5 a 29 años; además, es la causa número 8 en posición en pérdidas humanas de todas las edades y su índice de accidentalidad es 3 veces mayor en países de bajos recursos.

En Colombia la Agencia Nacional de Seguridad Vial, es la encargada de llevar los registros de los accidentes de tránsito, aunque reconoce un subregistro importante del fenómeno. Los accidentes registrados en mayor ocurrencia son: mantenimiento de distancia de visibilidad (18%), no uso de señales reflectivas (17%), desobediencia de señales de tránsito (14%), adelantamientos indebidos (9%), no respeto de prelación (7%), exceso de velocidad (5%), entre otras causas en menor porcentaje como aparente estado de embriaguez, condiciones climáticas, mal estado de la vía, y otras (ANSV, 2018).

La Organización Mundial de la Salud registra para Colombia en su reporte de 2018, un número de 18.5 decesos en accidentes de tránsito por cada 100 mil habitantes, de los cuales 1.6 son usuarios de vehículos, 9.7 usuarios de motocicleta, 4.8 peatones y uno es usuario de bicicleta. Las razones para presentar estos valores de accidentalidad según la ANSV (2018) son diversas;

¹ iRAP, Programa Internacional de Evaluación de Carreteras, constituido por expertos de organizaciones líderes en seguridad vial y organismos de investigación de todo el mundo.

sin embargo, hay factores que indudablemente han contribuido de manera notoria como: formulación y/o ejecución de la política de seguridad vial nacional y municipal, análisis y diagnóstico de la población objetivo, insuficiente investigación sobre los factores de riesgo, mediocre monitoreo y evaluación de indicadores y metas relacionados, así como un escaso recurso humano preparado y una débil capacidad presupuestal e institucional. La ANSV (2018) dentro de sus estadísticas evidencia que el mayor porcentaje de causa de accidente se debe al choque entre motocicleta y otro vehículo, contra objetos fijos en la vía y volcamiento del vehículo.

Los anteriores factores relacionados con la infraestructura vial, son los que despiertan un gran interés en la realización del diseño geométrico de la carretera, dado que sobre este factor pesa un alto porcentaje de la ocurrencia de accidentes en el país y el mundo, en donde el *iRAP* establece que mejorar la infraestructura y gestionar el control de la velocidad de los vehículos, podría ayudar a obtener carreteras de 3 o más estrellas, dicho de otro modo, vías más seguras. Es por esta razón, que surge la preocupación de disminuir la accidentalidad causada por la infraestructura vial, para lo cual, se ha investigado en gran variedad de países la reacción de los usuarios vehiculares para definir su recorrido dependiendo del tipo de carretera, su geometría, la topografía de la zona, el entorno y la naturaleza de los usuarios generales de la vía.

A nivel nacional; para el planteamiento del diseño de la geometría de una carretera, se sigue como normativa el manual de Diseño Geométrico de Carreteras (INVIAS, 2008), emitido por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Adicional, se debe seguir el manual de Señalización 2015 del INVIAS, que funciona como complemento informativo, reglamentario y preventivo sobre lo que un usuario se puede encontrar en la vía, anticipándose a su recorrido cerciorándose de su seguridad. Tanto los manuales de diseño geométrico como de señalización, tienen como principal objeto: la *seguridad vial*.

La seguridad vial, clasificada en *seguridad nominal*, la cual está especificada por la geometría, la capacidad de la vía y lo que se espera de ella y la *seguridad sustantiva*, que se refiere al desempeño real en la carretera determinada por los indicadores de accidentalidad. (Hauer, 2015).

Colombia, denominada como una nación en vía de desarrollo, una variedad en su topografía, una diversidad social y étnica y una deficiencia político-administrativa, hacen que las carreteras no sean homogéneas y por tanto tengan particularidades sectorizadas, situación que no ha sido considerada en el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2008), que está basado en el manual de la

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011) el cual parte de innumerables investigaciones en Estados Unidos de América (USA), siendo este un país totalmente diferente a Colombia, con condiciones favorables e ideales en el uso de las carreteras.

1.2 TEMA DE HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

A partir de la revisión bibliográfica detallada y de la aplicación del manual del INVIAS; surge el siguiente interrogante, el cual ha sido la motivación para el planteamiento del presente trabajo de investigación.

¿El diseño geométrico de las carreteras en Colombia garantiza seguridad y eficiencia de operación al usuario?

Esta pregunta está soportada en la siguiente conjetura:

HIPÓTESIS: La velocidad específica que se asigna en el diseño geométrico de una carretera según el Manual colombiano no responde ni a la condición de los usuarios que la utilizan ni a la diversidad del relieve por las que atraviesan las vías en el País.

El Instituto de Vías (INVIAS, 2008), estipula como principio para el diseño geométrico la determinación de las especificaciones de la carretera según su jerarquía y el tipo de terreno que se atraviese; posteriormente para ese proyecto, se deben definir los controles del diseño: velocidad y vehículo tipo. Cardenas, (2013), señala que la velocidad de diseño (V_D) o velocidad del proyecto, “es la velocidad guía o de referencia que permite definir las características geométricas mínimas de todos los elementos del trazado, en condiciones de seguridad y comodidad, representando una referencia mínima”.

La velocidad es entonces, un factor determinante en el diseño de una carretera. Define eficiencia; pero a la vez, es una característica crítica si no se implementa desde el punto de vista de seguridad vial; dado que, el exceso de velocidad es un accionador de los altos índices de accidentalidad (ANSV, 2018).

El criterio principal del diseño geométrico es el de garantizar la estabilidad del vehículo; por lo tanto, se procura que un vehículo al recorrer cada uno de estos elementos, conserve su velocidad; o en caso contrario, la incremente o disminuya moderadamente, de modo que atraviese la sección con rapidez y seguridad. Esa velocidad de recorrido se llama específica (V_{CH}), precisada por el

manual (INVIAS, 2008), como: la velocidad máxima más probable con que sería abordado cada elemento geométrico de forma segura y es con la que se debe diseñar en forma particular cada uno.

INVIAS (2008), plantea la velocidad específica para curvas y entretangencias horizontales a partir de los estudios de la consistencia del trazado referenciado en la AASHTO -2004-, en donde considera la reacción del conductor de acuerdo a su velocidad de tramo² y a la proximidad y características del siguiente elemento de la vía; involucrando las variables que afectan la velocidad específica en la entretangencia o en la curva precisadas por: velocidad del tramo, longitud de la del tramo recto anterior y ángulo de deflexión de la curva de análisis.

Actualmente existen investigaciones en diferentes países sobre cuáles son las variables y cuál es su peso que son consideradas en el concepto de: *consistencia en el diseño geométrico* definido por Nicholson, (1998) como la capacidad de la geometría de la carretera para cumplir con la expectativa del conductor. Adicional a las anteriores mencionadas, consideran: el radio y/o el grado de curvatura, la longitud de la curva y la pendiente, como menciona Luque (2016), en su artículo de *Recopilación de Parámetros que Intervienen para la Consistencia del Diseño Geométrico*. Puede agregarse que además de investigar la relación de esos parámetros con la asignación de la velocidad específica en Colombia, falta tener en cuenta el tipo de terreno que se atraviese resaltando que en Colombia este cambia en tramos muy cortos debido a su relieve irregular.

Con el propósito de determinar el cálculo de la velocidad específica en cada elemento del trazado de la carretera, para lograr una consistencia en el diseño geométrico de acuerdo a las diferentes características del terreno y del entorno, en busca de obtener una vía segura para el usuario, propone validar el método propuesto en el Manual colombiano de diseño geométrico, identificando que variables afectan esa consistencia y determinando la relación entre ellas. Esas variables son: velocidad de salida y longitud del tramo recto a la curva de estudio y deflexión. El propósito de esta investigación es proporcionar evidencias que recomienden la reformulación de un método más pertinente para asignar las velocidades específicas y que sean incorporadas al manual de diseño colombiano.

² Velocidad de tramo: es la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de un tramo no menor de 3 km (MDG,2008)

1.3 JUSTIFICACIÓN

La formulación de un proyecto vial se lleva a través de tres fases consecutivas: prefactibilidad, factibilidad y los estudios definitivos; en todas ellas el diseño geométrico es primordial considerando que de este dependen todos los estudios que involucran la ingeniería vial: geotécnicos, hidrológicos, estructurales, de tránsito, etc. Determinar el trazado más adecuado de la carretera, es buscar un equilibrio entre la seguridad vial de los usuarios, la comodidad del conductor durante el recorrido, la disminución de los costos de operación, el menor impacto ambiental y la optimización de los costos de inversión del proyecto (AASHTO, 2011).

Es necesario seguir una normativa para la realización de los trazados geométricos; es así como Bartlett (2016), señala que muchos países en el mundo tienen su propia directriz o normativa para el diseño geométrico de las carreteras; algunos calificados por el autor como muy buenos, como los que rigen en: Emirato de Abu Dabi, Australia, Austria, Finlandia, Alemania, Países Bajos, Noruega, Rusia, Suecia, Suiza y Estados Unidos; los manuales de Chile, Ecuador, Perú y Argentina con versiones de 2016 hacia adelante, los denomina como útiles.

El manual que rige en Colombia, lo ha señalado como limitado, por su versión desactualizada -2008-. Complementando lo anterior, (Posada, González, & Farbiaz, 2015), en su artículo *Políticas de Diseño Geométrico de Carreteras de Colombia*, enfatiza que el manual colombiano no es el resultado de investigaciones hechas en el país sino la adaptación del norteamericano del (AASHTO, 2011), en su versión AASHTO, 2004³ y anteriores.

Para garantizar ese equilibrio en un proyecto vial rural en Colombia, el diseño geométrico debe estar ajustado a las indicaciones dadas en el Manual de Diseño Geométrico (INVIAS, 2008), el cual pretende estructurar el proyecto con una consistencia de diseño geométrico adecuada; que conceda a los conductores la seguridad y comodidad, de tal manera que las causas de los accidentes de tránsito causados por la geometría de la carretera sean mínimos (Polus & Mattar-Habib, 2004).

Investigaciones identificaron que la consistencia de diseño y la seguridad vial están altamente relacionadas (Anderson, Bauer, Harwood, & Fitzpatrick, 1999; Awatta, Hassan, & Sayed, 2006; Cafiso, Di Graziano, Di Silvestro, La Cava, & Persaud, 2010; Llopis-Castelló, Camacho-Torregrosa, & García, 2018; Montella, Colantuoni, & Lamberti, 2008; Montella & Imbriani, 2015; Joanne C.W Ng & Sayed, 2004; Wu, Donnell, Himes, & Sasidharan, 2013)

³ El Manual de la AASHTO se encuentra actualmente en la versión 2018.

Wooldridge et al. (2003), definen la consistencia en el diseño geométrico como la reacción y comportamiento del conductor a partir de los elementos geométricos que conforman la vía y que se aproxima a transitar.

El Plan Nacional de Seguridad Vial de Colombia (MinTransporte, 2013) indica que la cifra de accidentes de tránsito entre el 2005 y el 2014 fue de 1'836,373, cobrando la vida de 58,121 personas y dejando lesionadas a 411,956; estos valores pueden ser evidencia de que el diseño de las vías, utilizando el manual de diseño geométrico, puede incluir diseños con una consistencia pobre. INVIAS (2008) reconocen que los conductores colombianos presentan una relativa indisciplina en acatar la velocidad límite rotulada; para sopesar este hecho, en el proceso de diseño se define una velocidad de diseño específica para cada elemento en los alineamientos horizontal y vertical (curvas y entretangencias).

Los autores utilizaron estudios realizados en países con idiosincrasia similar a la colombiana para definir las velocidades de diseño, este hecho puede ser el que genere los problemas de consistencia, dado que no tiene en cuenta el comportamiento particular de los conductores en nuestro país.

1.4 OBJETIVOS

A partir de los planteamientos anteriores, se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivo general

Validación del procedimiento de designación de la velocidad específica de una curva horizontal específicamente sobre terreno montañoso, definida en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de Colombia.

Objetivos específicos

- Identificación de los factores que influyen en la consistencia del diseño geométrico de una carretera en terreno montañoso en Colombia.
- Definición de un método para deducir las velocidades de diseño, operación y específicas en un tramo de carretera sobre terreno montañoso existente, con características particulares.
- Planteamiento de la valoración de la velocidad específica de un elemento curvo sobre el trazado horizontal de una carretera sobre terreno montañoso.

1.5 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación que corresponde a la *Determinación de la Velocidad Específica de Curvas Horizontales en Carreteras Rurales sobre Terreno Montañoso*; obedece a la necesidad de validar el mecanismo con que el Manual de Diseño Geométrico de Colombia establece la velocidad máxima en cada elemento del trazado de una vía, que será con la que el conductor se desplace de forma segura y eficiente a través de una carretera durante su operación.

La normativa colombiana, ha surgido a partir de las investigaciones realizadas en los Estados Unidos de América, publicadas por la AASHTO, (2011) y en países con idiosincrasia similar a la colombiana; no considerando las particularidades del país como son la variedad de su relieve y la idiosincrasia de su población que difiere en el comportamiento de los conductores de acuerdo a su región de origen.

Se ha planteado este trabajo de investigación, como requisito para optar al título de Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres de la Universidad del Cauca. Tiene como objeto analizar el proceso de asignación de las velocidades específicas; considerando, las tendencias del crecimiento y modernización del parque automotor, la adaptación a las nuevas tecnologías y a su rápida evolución, la disponibilidad de los recursos de inversión y sobre todo para responder a las prioridades de seguridad vial a nivel global.

La metodología planteada surge a partir del concepto de *Consistencia en el Diseño Geométrico*, que se refiere a la travesía de un conductor por un tramo de carretera, sin que realice cambios bruscos de velocidad causados por la sucesión de rectas y curvas que atenten con su seguridad (AASHTO,2011).

Para determinar la velocidad específica, se trabajó sobre un tramo de la carretera: Popayán-Totoró en el Departamento del Cauca; categorizada de primer orden, ubicada en terreno montañoso, con buenas especificaciones en cuanto a su sección transversal, estado de la superficie del terreno y mínimos accesos no controlados y de un bajo tránsito promedio diario.

Se realizaron lecturas de velocidad con un receptor cartográfico de posicionamiento global (GPS) dinámico, sobre un vehículo único a flujo libre, con diferentes conductores, realizando el recorrido en forma continua por una longitud de 7 km.

En el trayecto, se analizaron 46 curvas horizontales con radios de curvatura entre 41 m y 150 m, deflexiones entre 40 y 199 grados, entretangencias menores a 400 m y pendientes hasta el 9%

en ascenso y descenso. Con los resultados de campo, se determinó la velocidad de operación en cada punto de inicio (PT_{ant}) y terminación de todas las rectas (PC) y en el punto medio (Pm) y final (PT) de cada curva. Se estipuló el cambio de ritmo de cada sujeto o conductor al entrar a una curva horizontal después de un tramo recto; finalmente, se establecieron las variables mediante observaciones analíticas y análisis de regresión, determinando aquellas que más afectan la variación de velocidad, como son: longitud del tramo anterior, deflexión, el radio y la longitud de la curva de estudio.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Dentro de este capítulo se ha establecido la fundamentación teórica en donde se soporta el tema de la investigación enfatizando los siguientes conceptos: *velocidades de diseño, específica y operación, consistencia del diseño geométrico y definición de las variables que intervienen en la consistencia*. Por otro lado, para efecto del manejo de datos y variables de tal forma que se pueda determinar aquellas de más peso en los cambios de velocidad tomados como respuesta, se establece el concepto de modelo estadístico por medio de análisis de varianza.

2.1 VELOCIDAD DE DISEÑO, OPERACIÓN Y ESPECÍFICA

El diseño geométrico está controlado por: la determinación de la sección transversal de la vía, considerando sus elementos y dimensiones, y la velocidad de diseño la cual define las especificaciones del alineamiento horizontal y vertical del trazado.

La velocidad está condicionada al comportamiento del conductor, el cual busca durante su desempeño un equilibrio entre el riesgo objetivo (Aquel cuando no hay cumplimiento de pautas o normas en el diseño propios de la geometría) y el riesgo percibido (Aquel que detecta el conductor y está relacionado con su seguridad), (Figuroa Medina, n.d.). Es la necesidad de la seguridad, la que determina la velocidad con la que se debe diseñar una carretera. Ahí surge los conceptos de velocidad de diseño para todo el tramo, la velocidad específica para cada elemento y la velocidad de operación que finalmente refleja el comportamiento del conductor. A continuación, se describen los conceptos de cada una de estas velocidades.

La *velocidad de diseño* (V_D), es la máxima velocidad razonablemente uniforme, que sería aprobada por el grupo de conductores más rápido, lejos de las zonas urbanas, durante la operación de los vehículos en un tramo delimitado; así mismo, se encargará de establecer las distintas características de diseño geométrico de la carretera (AASHTO, 2011).

INVIAS, (2008), en el manual de diseño geométrico del INVIAS, la especifica como el parámetro utilizado para determinar la geometría de una carretera; ésta se estipula a partir de su categoría y de la topografía del terreno que la atraviesa. El manual caracteriza la longitud total de la carretera en sectores de características similares denominadas como tramos homogéneos (Longitudes mayores a 3 km). Cardenas, (2013), señala que la velocidad de diseño (V_D) o

velocidad del proyecto, es aquella que sirve de referencia para determinar las características geométricas mínimas de todos los elementos del trazado, en función de la seguridad y comodidad. En la Tabla 1, se ilustra cómo se determina la velocidad de diseño y velocidad de tramo, en función de la categoría de la carretera y del tipo de terreno.

Tabla 1 Determinación de la velocidad de diseño VD, (INVIAS, 2008)

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (km/h)												
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110			
Primaria de dos calzadas	Plano													
	Ondulado													
	Montañoso													
	Escarpado													
Primaria de una calzada	Plano													
	Ondulado													
	Montañoso													
	Escarpado													
Secundaria	Plano													
	Ondulado													
	Montañoso													
	Escarpado													
Terciaria	Plano													
	Ondulado													
	Montañoso													
	Escarpado													

Fuente: Manual de Diseño Geométrico, INVIAS, (2008)

En un tramo de vía se pueden encontrar diferentes velocidades de diseño en los elementos (rectas o curvas), las cuales son utilizadas para garantizar un recorrido seguro y constante para los conductores con la velocidad más probable con que sería abordado cada uno de dichos elementos; INVIAS (2008), la denominan como *velocidad específica* de cada elemento de la geometría de la vía y están en función de la velocidad de diseño y/o de tramo; el manual la acuerda igual a la velocidad de tramo o máximo 20 km/h superior a esta (ver detalle de asignación de velocidad específica en el numeral 5.1.1 Procedimiento de asignación de la velocidad específica en el Manual)

La *velocidad de operación* está definida como: percentil 85 de la distribución de velocidades de los vehículos circulando en condiciones de flujo libre en un tramo de carretera (Gibreel, Easa, Hassan, & El-dimeery, 1999).

2.2 CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO

Es reconocido en la práctica del diseño geométrico considerar los elementos de control en las curvas horizontales de manera independiente; de tal forma, que se inspeccione la estabilidad de un vehículo en función del radio de curvatura, la fricción existente entre la superficie de rodadura y las llantas del vehículo y el peralte pasando a una máxima velocidad (AASHTO, 2011); esto es bajo el supuesto de que las vías tengan poca y suave curvatura.

En caso de que se presenten vías con curvaturas sucesivas y pronunciadas, se limita la capacidad del tráfico, se generan pérdidas económicas debido al incremento del tiempo de viaje y costos de operación y finalmente, se disminuye la estética de la travesía. Cada consecuencia expuesta responde a la seguridad que el conductor espera durante su práctica. AASHTO (2011), propone entonces que un alineamiento debe ser: práctico desde el punto de vista de construcción y medio ambiente y cómodo para el conductor, es decir con tramos rectos largos que permitan la visibilidad y amplios radios que no modifiquen su movimiento; se debe, por lo tanto, diseñar un alineamiento *consistente*.

La consideración de *consistencia de diseño geométrico* y su aplicación no es un criterio nuevo en la formulación de proyectos viales. Asegurar la consistencia en la velocidad implica otorgar prioridad máxima a la seguridad dado que éstas están altamente correlacionadas (Polus & Dagan, 1987). Krammes, e Irizarry (1998), explican este concepto como la interacción entre los componentes del sistema vial: conductor, vehículo y carretera sin que haya riesgo de la ocurrencia de un accidente. Wooldridge et al. (2003) la definen como la conformidad de la geometría de una carretera con la atención del conductor, cometiendo menos errores en la proximidad de las características geométricas que se ajustan a sus expectativas. Ng & Sayed, (2004) indican que la consistencia se realiza con el fin de mejorar en el desempeño de la seguridad del conductor; adicionando, que puede medirse a través de modelos que se convertirán en herramienta cuantitativa para evaluar el impacto de la coherencia del diseño en la seguridad vial.

Es posible valorar la consistencia del diseño geométrico a partir de tres consideraciones (Gibreel et al., 1999): la de velocidad, la seguridad y la de desempeño del conductor; en éstas se identifican cuatro áreas de interés para los investigadores y diseñadores, estas son: la estabilidad del vehículo, los índices del alineamiento, la carga al conductor y la velocidad de operación (Awatta et al., 2006). Las consideraciones de velocidad han sido ampliamente estudiadas dado que

esta variable corresponde a la expresión de la seguridad percibida por los conductores; no obstante, es necesario analizar el comportamiento de los usuarios a través de la velocidad operacional, la cual es definida como la velocidad en que circulan los vehículos a flujo libre; se estima, como el percentil 85 de la distribución de los vehículos observados y es la velocidad máxima probable a la cual serán observados (Fitzpatrick, Carlson, Brewer, Wooldridge, & Miaou, 2003).

Ng & Sayed (2004), puntualiza que la consistencia del diseño se conoce como la diferencia entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño inferida (es la velocidad que se determina de acuerdo a las características geométricas existentes en la vía en forma independiente).

Para medir la consistencia del diseño se ha fijado un mecanismo utilizando el análisis del perfil de velocidad, resultado de relacionar la velocidad de operación continua de un vehículo a lo largo de todo el trayecto de estudio. Polus & Mattar-Habib (2004), Castro, et al. (2011), Pérez-Zuriaga, Camacho-Torregrosa, & García (2013), parten del perfil de velocidad en las tangentes y curvas del tramo para encontrar un modelo que califique la consistencia; además, especifican las variables para generar un perfil de velocidad teórico. Almeida, Vasconcelos, & Bastos Silva, (2018) señalan que, el perfil presenta la consistencia a causa de la reducción de la velocidad que se relaciona con la seguridad al acercarse a la curva.

Llopis-Castelló, Bella, Camacho-Torregrosa, & García (2018), presentan el modelo de consistencia global basado en la diferencia entre el perfil de velocidad de operación inercial (V_i) y el perfil de velocidad de operación (V_{85}). El primero se calcula como la velocidad promedio ponderada de la sección de carretera anterior y representa las expectativas de los conductores, mientras que el segundo representa el comportamiento de la carretera.

INVIAS, (2008), tiene en cuenta también la consistencia aplicándola a través del cálculo de la velocidad específica; la cual, está en función de la velocidad del tramo como se mencionó en su definición anterior. Esta velocidad varía entre elementos entre 0 y 20 km/h, buscando que no haya cambios bruscos de velocidad al pasar de un tramo recto al curvo. La asignación de la velocidad específica, manteniendo la consistencia en el diseño, está consignada en el presente documento en la

Tabla 12. Asignación de velocidad específica – que se encuentra en la Tabla 2.2 del Manual de diseño Geométrico de Colombia - 2008.

La Tabla 2 a continuación, representa un resumen de la definición de la consistencia de acuerdo a la recopilación de algunos de los autores citados en los párrafos anteriores.

Tabla 2. Resumen según los autores de la definición de la consistencia del diseño geométrico

CONSISTENCIA EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO		
Interacción entre los componentes del sistema vial sin riesgo de accidente (Krammes, Irizarry) CONDUCTOR VEHICULO CARRETERA		
Factores de la consistencia	Areas de interés	Medición de la consistencia
VELOCIDAD SEGURIDAD DESEMPEÑO	ESTABILIDAD DEL VEHICULO INDICES DE ALINEAMIENTO CARGA DEL CONDUCTOR VELOCIDAD DE OPERACIÓN	PERFILES DE VELOCIDAD MODELOS

Fuente: elaboración propia

2.3 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA CONSISTENCIA DE DISEÑO GEOMÉTRICO

A continuación, se presenta un resumen de algunos de los resultados presentados por investigadores de diferentes países, acerca de las variables que intervienen en la determinación de la consistencia del diseño geométrico a través de la determinación de las velocidades de operación; los métodos utilizados para captura y procesamiento de la información no se han detallado en esta representación.

Se describe el autor o autores de los artículos presentados en revistas científicas producto de sus trabajos de investigación, siguiendo un orden cronológico de su año de publicación, el listado de variables y el país de origen, Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de las variables que influyen en la velocidad de operación para determinar la consistencia.

AUTOR	AÑO	VARIABLE	PAIS
Taragin	1954	Radio	USA
Mc Lean	1979	Vel. Deseada	Australia
Lamm anda Chueri	1987	Radio	USA
Kanellaidis et al.	1990	Radio	Grecia
Krammes et al.	1995	Radio, long. curva, deflexión	USA
Voigth	1996	Radio, long. curva, deflexión y peralte	USA
Fitzpatrick et al.	2000	Radio, pendiente longitudinal	USA
Ottesen anda Krammes	2000	Grado de curvatura, long.curva, vel deseada	USA
Castro et al.	2008	Radio	España
Pérez Zuriaga et al.	2010	Radio, tasa de cambio de curvatura	España
Memon et al.	2012	Grado de curvatura, radio, long. de tangente, long. Curva, Velocidad deseada	Pakistán
Castro et al.	2013	Radio	España
Shallam, Ahmed	2014	Radio, deflexión y distancia visual	India
Echaveguren y A. Díaz	2015	Radio, long. Tangente, gradiente de velocidad	Colombia
Boroujerdian et al.	2016	Pendiente longitudinal, velocidad inicial, velocidad límite	Irán
Almeida et al.	2018	Comportamiento (desaceleración)	Portugal

Fuente: Castro M. et al. 2013, modificado.

Existen escalas para medir la consistencia; estas han sido desarrolladas por distintos científicos; (Calero Valenzuela, 2015) en su documento: “Aplicación de curvas características de funcionamiento del receptor para la selección de valores de umbral para escalas de consistencia de diseño geométrico de carreteras”, las recopila y se reportan en la Tabla 4. Escalas de calificación de la consistencia por distintos autores. Se describen las variables que se consideran para establecer la valoración de la carretera, la cual se ha catalogado como Buena, Regular y Mala.

Sin embargo, esta evaluación sigue en continuo estudio, sobre todo considerando que cada país tiene sus características particulares que modifican los modelos.

Tabla 4. Escalas de calificación de la consistencia por distintos autores

DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA	AUTOR	VARIABLES	CALIFICACION DE LA CONSISTENCIA DE DISEÑO		
			BUENO	REGULAR	POBRE
Diferencia entre Velocidad de operación y velocidad de diseño en un punto específico	Lamm, 1998	$V_{85} - V_D$	$X \leq 10$	$10 < X \leq 20$	$X > 20$
Diferencia entre factor de fricción suministrado y demandado	Lamm, 1998	ΔfR	$X > 0.02$	$-0.02 \geq X \geq 0.02$	$X < -0.02$
Diferencia entre la velocidad de operación en dos puntos	Lamm et al. 1995	$V_{85n} - V_{85n-1}$	$X \leq 10$	$10 < X \leq 20$	$X > 20$
Area entre perfil de velocidad y velocidad media	Polus and Mattar, 2004	C	$X > 2$	$1 < X \leq 2$	$X \leq 1$
Percentil 85 de las velocidades de operación entre puntos consecutivos	Calero et al. 2015	Δ_{85VBP}	$D_{85VBP} < 4.8$	$4.8 \leq D_{85VBP} \leq 6.4$	$6.4 \leq D_{85VBP}$
Diferencia entre velocidad inercial y velocidad de operación	Llopis, Castelló 2018	$V_i - V_{85}$	$CL \leq 2075$	$2.75 < CL \leq 4.5$	$CL > 4.5$

Fuente: Calero, (2015), modificado

2.4 ANÁLISIS DE VARIANZA

Este método estadístico conocido como ANOVA, es utilizado cuando se tienen dos o más variables en un experimento o un trabajo de observación. Evalúa la importancia de cada uno de esos factores al comparar las medias de la variable de respuesta. La ANOVA, prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales (Hipótesis nula) y que al menos una es diferente (Hipótesis alternativa), (Walpole, Myers, 2012).

Este modelo se utiliza para predecir los valores de nuevas observaciones, identificar la combinación de valores predictores que en conjunto optimicen uno o más valores ajustados y crear un modelo que se utilice para predecir el valor respuesta con un grado de confianza determinado. La prueba de hipótesis es la forma de determinar una conclusión mediante un proceso de decisión en un grupo de datos acerca de algún sistema científico de un tamaño de muestra determinado con un margen de verdad o falsedad considerando que no se está examinando toda la población. El mecanismo para llegar a una conclusión respecto a la relación entre la variable respuesta y las variables que son estadísticamente significativas se realiza mediante la expectación de modelos de regresión que proyecta como resultados los coeficientes que detallan dicha relación de variables. Estos coeficientes son principalmente: el valor-p, la significancia y la correlación. En el siguiente

cuadro (Tabla 5) se define que representa cada uno de ellos y en el capítulo 5 en el análisis de datos se expone la interpretación de estos, (Walpole, Myers, 2012).

Tabla 5. Definición de los coeficientes de regresión

COEFICIENTE	NOMBRE DE COEFICIENTE	DESCRIPCION
Valor-p	Valor de probabilidad	Contraste de hipótesis de 0 - 1
α	Nivel de significancia	Probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula
R^2	Correlación	% de variación que mejor se ajusta al modelo
Valor T	Valor T	Relación entre el coeficiente y su error estándar
Cp de Mallows	Cp de Mallows	Compara modelos de regresión con los distintos predictores
FIV	Factor de inflación de varianza	Indica cuánto se infla la varianza de un coeficiente debido a las correlaciones entre los predictores

Fuente: elaboración propia, sobre definiciones de Minitab

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 CLASIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación según su propósito es considerada de tipo aplicada; por su nivel de profundidad, se considera como exploratoria; sin embargo, es a la vez correlacional ya que se relacionan unas variables con otras. De acuerdo a la naturaleza de la información, este proyecto presenta una investigación cuantitativa en donde los datos son tomados directamente en campo. En cuanto a las variables utilizadas; tienen estas, una manipulación experimental de inferencia estadística.

3.2. METODOLOGIA ADOPTADA

Para el desarrollo del proyecto de investigación para lograr los objetivos propuestos, se ejecutaron las siguientes etapas:

- Refinamiento de la metodología – Etapa 1.
- Trabajo de campo – Etapa 2.
- Procesamiento de la información – Etapa 3.
- Generación de la base de datos – Etapa 4.
- Resultados obtenidos y conclusiones – Etapa 5.

Esta metodología está esquematizada en la Figura 1, mediante un diagrama que pretende comunicar el proceso utilizado en la planeación, desarrollo y resultados obtenidos durante la investigación.

El diagrama está distinguido por colores, los cuales compendian la etapa del proyecto a la que corresponde cada actividad.

Etapa 1 (color rosa en el diagrama); corresponde a la revisión de literatura relacionada con el tema de investigación, tomando como palabras claves; consistencia en el diseño geométrico, velocidades de diseño, operación y específica. Dentro de revisión, se determinó la importancia de

establecer la geometría de la carretera como parámetro fundamental y característico; así como también la identificación de las velocidades y los mecanismos para su determinación. Trayendo a mención que el presente estudio está enfocado al cálculo de velocidades específicas en terreno montañoso, es en esta etapa en donde se define que tramo de carretera es propia de este tipo de terreno para el desarrollo de la investigación. Por otro lado, la literatura ha sido fundamental para establecer los modelos estadísticos de estimación de las velocidades en función del trazado geométrico de la vía.

La etapa 2 (color verde en el diagrama); muestra el trabajo de campo realizado para obtener la recopilación de los datos tanto de la geometría de la vía como de la medición de las velocidades, como insumos para el proceso de la investigación. Para los dos tipos de datos: distancia y velocidad, se utilizó un receptor de GPS cartográfico colocado en un vehículo conducido por diferentes sujetos, obteniendo puntos secuenciales con coordenadas georreferenciadas como captura de datos.

La etapa 3 (color azul en el diagrama); se refiere, al procesamiento de los datos tomados con GPS, transformándolos en distancias (abscisas específicamente) y velocidades, encontrando la velocidad por sujeto en ciertos puntos específicos referenciados por su abscisa, del trazado de la vía como son los puntos de inicio, puntos medios y puntos al final de cada curva horizontal existente. Dentro de esta etapa se visualizó el comportamiento de la velocidad por usuario y por curva, resultado de los perfiles de velocidad realizados con los datos sin correlacionar variables geométricas.

La etapa 4 (color rosa oscuro); recopila, los datos de campo procesados y clasificados por su geometría por medio de las variables: radio, deflexión, longitud de la curva horizontal, longitud de la entretangente y pendiente longitudinal de cada curva del análisis del estudio. De igual manera, se asoció a cada curva el resultado de la velocidad obtenido por cada sujeto, considerando esta variable como la dependiente. Con esta base de datos se estableció un resumen del tipo de información obtenida; valores mínimos, máximos, medias, desviación estándar de cada una de las variables geométricas y así mismo, de la velocidad. La base de datos fue elaborada con el fin de correlacionar las variables independientes y establecer cuál es el impacto de cada variable que influye en la velocidad. En resumen, la base de datos conformada, será la plataforma para realizar el análisis de variables (ANOVA) y con base en este encaminar los resultados en función de los

objetivos inicialmente propuestos. El capítulo 4, compendia todo el proceso desarrollado para la recopilación y la descripción de los datos tomados en campo.

La etapa 5 (color amarillo en el diagrama); representa los resultados de la investigación en respuesta a los objetivos formulados, partiendo del análisis de datos y proporcionando las conclusiones del trabajo, los logros y recomendaciones.

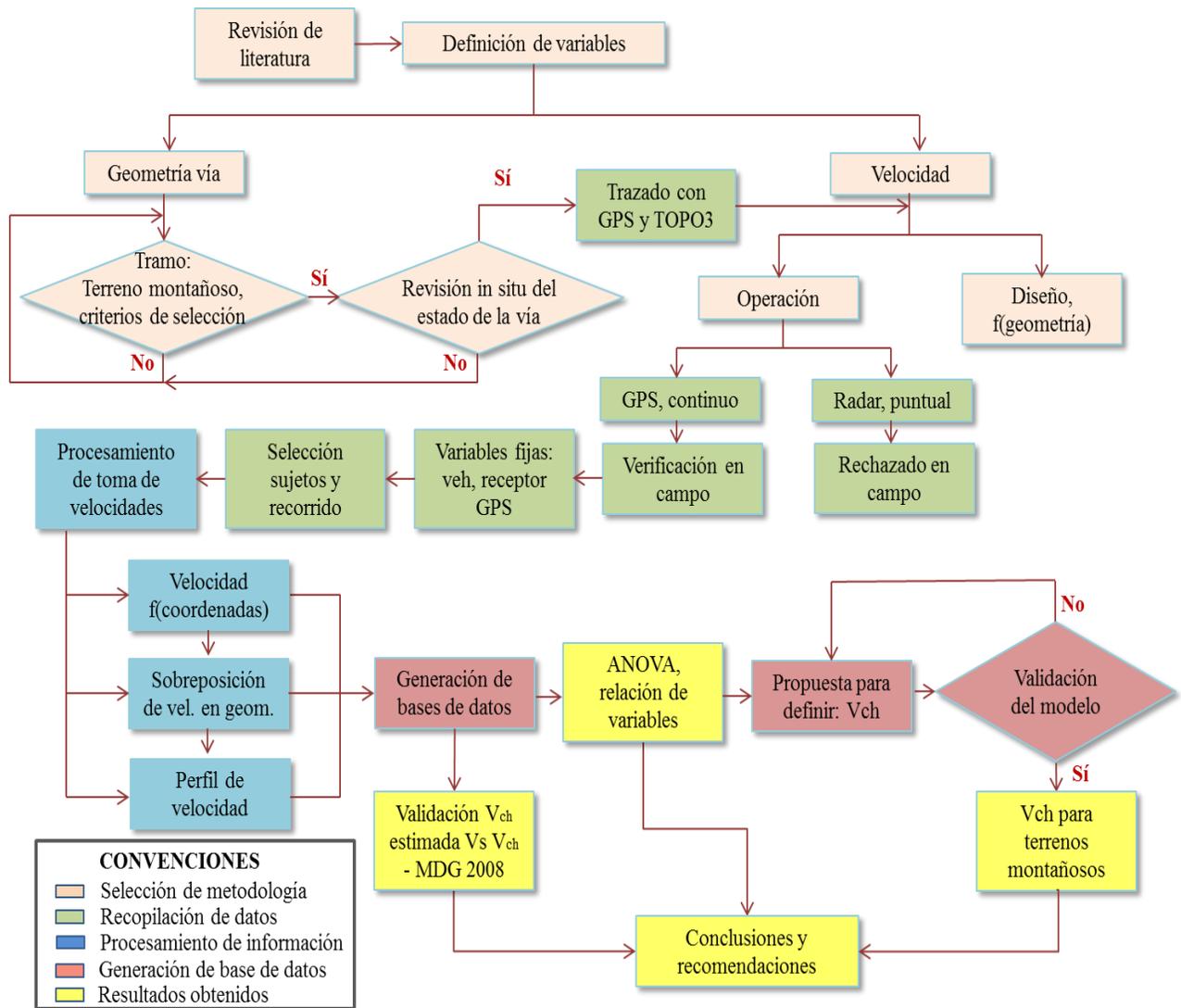


Figura 1. Diagrama de la metodología utilizada para la investigación

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO 4. RECOPIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE DATOS

4.1 TRABAJO DE CAMPO SELECCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

Como resultado de la revisión de la literatura sobre la consistencia en el diseño geométrico de un trazado, se precisaron las variables que intervendrían en el propósito; variable dependiente, *la velocidad de operación* y las variables independientes, algunas expuestas en la Tabla 1, proporcionadas por la geometría de la vía: *el radio de la curva (R)*, *la deflexión (Δ)*, *la longitud del tramo recto anterior (Ent ant)*, *Longitud de la curva circular (Lc)* y *pendiente longitudinal (P%)*.

Teniendo en cuenta que la finalidad de la investigación, está enfocada en la determinación de la velocidad específica sobre terreno montañoso; el siguiente paso, correspondió a la búsqueda de uno o varios tramos de carretera que cumplieran con las características de este tipo de terreno.

Se escogieron distintos tramos en Google-Earth, cercanos a la ciudad de Popayán; localizando por medio de la selección de ruta en una forma aproximada, el trayecto de la vía y exportando el trazado marcado en Google al programa TOPO3⁴ (Solano, 2019). En este software, se realizó un acercamiento del trazado por el eje de la vía y en forma aproximada se determinó las características geométricas, por medio de alineamientos rectos y curvos, aproximando las curvas a circulares.

Con los datos anteriores y basados en el resultado de la deducción de la influencia de la tortuosidad para la actualización del Manual de Capacidad de dos carriles y vías multicarril⁵; se pudo encontrar la clasificación del terreno en función del grado de curvatura ($\Sigma\Delta/\text{km}$), radio, deflexión, pendientes y la suma de bajadas y subidas por km.

Esa clasificación se resumió en una tabla resultado del procesamiento de información de datos de varias carreteras del país del proyecto iRAP propuesto por la ANSV y realizado en el 2015 por la Universidad del Cauca. La Tabla 6, presenta la clasificación del terreno según las

⁴ Programa de computador de topografía y diseño de carreteras del ing. Efraín Solano profesor de la Universidad del Cauca.

⁵ Trabajo realizado por la Universidad del Cauca para el Instituto Nacional de Vías de Vías. Ing. Alexandra Rosas Palomino

características geométricas encontradas en el trazado delineado de TOPO3, resaltando con el recuadro rojo, las correspondientes a terreno montañoso.

Tabla 6. Clasificación del terreno según la geometría de la vía (Terreno montañoso)

Grado de curvatura $\Sigma\Delta^\circ/\text{Km}$	Radio (m)	Deflexión (grados)	Pendiente %	Sub+baj (m/Km)	Tipo de terreno
0 - 30	> 500	< 30	< 4%	< 30	Plano
30 - 200	100 - 500	30 - 80	4 % - 7%	35 - 60	Ondulado
200 - 400	40 - 100	80 - 120	7% - 9%	60 - 70	Montañoso
400 - 800	< 40	> 120	> 9%	> 70	Escarpado

Fuente: elaboración propia

Al mismo tiempo, se analizaron aquellos tramos que tuvieran una calzada con doble sentido y volumen vehicular moderado (menor a 5,000 vehículos por día⁶); de tal manera, que se permitiera con mayor facilidad tomar información de velocidad con circulación a flujo libre. Awatta y otros, (2006) definen velocidad a flujo libre, (ffs por sus siglas en inglés) como la velocidad máxima con la que un conductor circula con confianza por un trayecto, restringido solamente por la superficie de rodadura, los límites de velocidad rotulares y la geometría de la sección transversal más no por otros vehículos en circulación, (Poe, C. M., Tarris, J. P., & Mason Jr, 1996) y actuales.

Después de varias pruebas en diferentes tramos que cumplieran con los criterios de selección de terreno montañoso (Tabla 6), es decir radios entre 40 y 100 m, y/o deflexiones entre 80 y 120° y/o pendientes entre (+o-) 7 al 9%, se eligió la vía Nacional de primer orden: Popayán-Totoró-Inzá en el Departamento del Cauca, Ruta 2602 llamada también “Transversal del Libertador”, entre los kilómetros 1 y 8, de los 90 kilómetros totales de su longitud. Ver localización del tramo en la Figura 2, en donde se muestra la vía dentro del Departamento del Cauca y a la vez la ubicación del Departamento con respecto a Colombia; en el mismo gráfico, se muestra la vía trazada en el programa TOPO3.

⁶ Proceso que se realizó revisando las cartillas de volumen de tránsito expedida cada año por el Ministerio de Transporte de Colombia, 2017

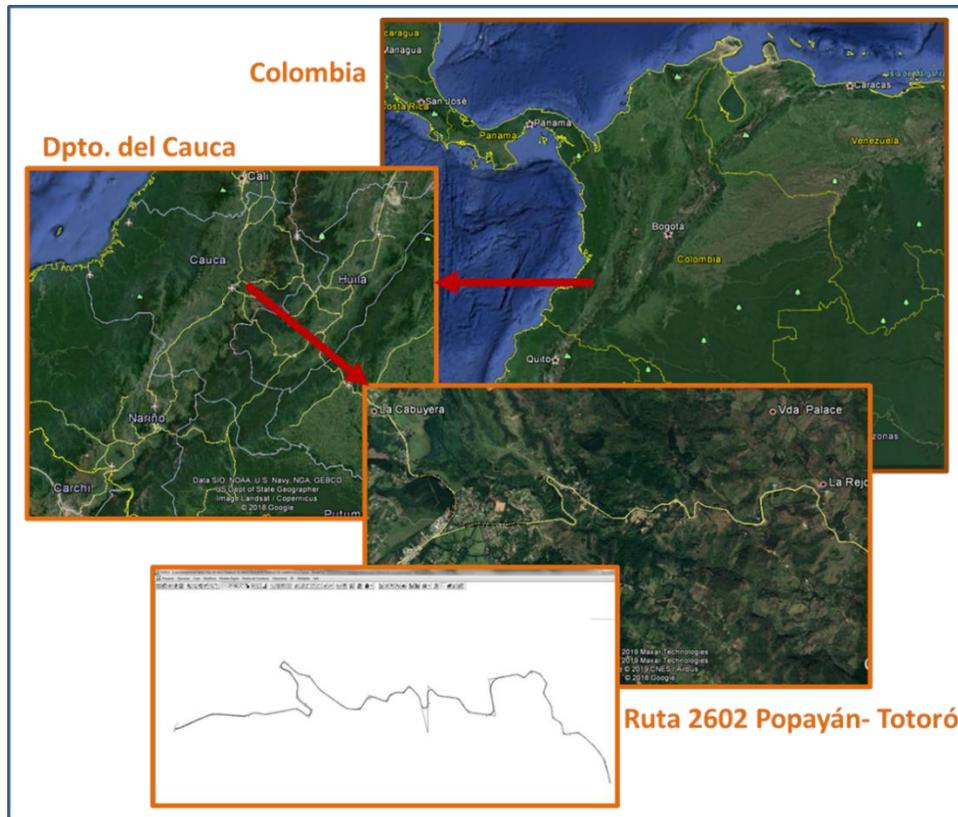


Figura 2. Localización del tramo de estudio Popayán-Totoró-Inzá.

Fuente: elaboración propia sobre imagen de Google-Earth y trazado en TOPO3.

El tramo seleccionado, con superficie de rodadura en concreto asfáltico en buen estado, debidamente demarcada, carretera de dos carriles, ancho de carril de 3.65m, calzada 7.3m, berma de 1m y cuneta de 0.5m. Además, con pocos accesos no controlados. La *Figura 3*, describe una sección transversal tipo del sector del estudio, con las medidas de las partes que conforman la sección transversal.



Figura 3. Sección transversal típica del tramo de estudio.
 Fuente: Navarrete, Ramos trabajo de investigación, modificado

Se presenta en la Figura 4, un resumen que recopila la selección del tramo de estudio.

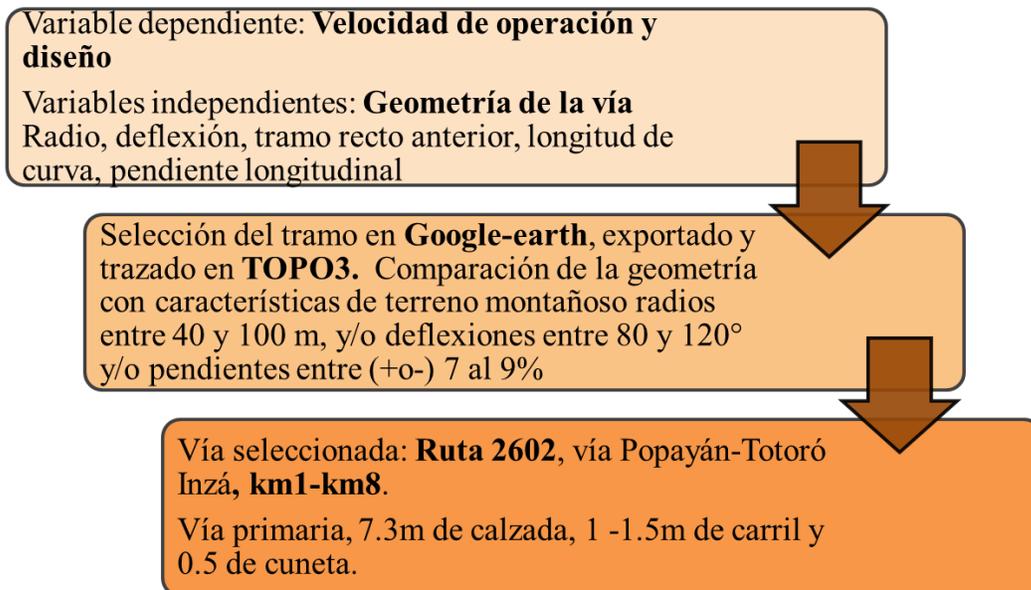


Figura 4. Resumen de la selección del tramo de estudio
 Fuente: elaboración propia.

4.2 PROCESAMIENTO DE TOMA DE DATOS

4.2.1 Recopilación de datos geométricos:

Se recorrió la vía a baja velocidad (30kph) con un GPS cartográfico, con la intención de precisar un trazado de la carretera con mayor exactitud a aquel obtenido con Google-Earth; con el fin, de marcar el eje de la vía que se utilizó como base espacial para determinar la geometría de todo el proceso de información. El receptor registró las coordenadas geográficas (Latitud, longitud y cota) punto a punto por segundo, tomando en promedio lecturas cada 8m, para un total aproximado de 900 puntos GPS. Con el programa TOPO3, se realizó la conversión de geográficas a rectangulares (Norte, Este y cota) en el sistema Magna Sirgas⁷, zona Oeste.

Con las coordenadas rectangulares se dibujó el eje de la vía en TOPO3; sobre éste, se realizó un diseño geométrico con curvas circulares y tramos rectos; aproximándose, lo máximo posible al eje tomado con GPS. El resultado de este diseño, se precisó mediante la geometría de la vía, la cual se especifica en la Tabla 7. Datos geométricos de las curvas horizontales del tramo de estudio.

El corolario final fue de un alineamiento con un total de 46 curvas horizontales, con deflexiones entre 4° y 165°, radios entre 38 m y 1280 m (los radios >400m son muy pocos en este trayecto) y entretangente máxima de 330 m. Con la información del tercer componente de las coordenadas (Cota), se determinó un perfil de terreno aproximado, el cual permitió estipular las pendientes de ascenso y descenso existentes en el trayecto. En la Figura 5, se presenta en planta-perfil el trazado de la carretera de análisis; el diseño en planta dibujado con coordenadas rectangulares y el diseño en perfil en donde se relaciona: *abscisa Vs cota* del alineamiento vertical, ceñido al perfil de la superficie de rodadura. Adicional en el gráfico se alcanza a visualizar en la parte inferior la localización de las curvas horizontales existentes por abscisa, relacionada en el perfil y representadas mediante una C girada en 90°; cuando la C mira hacia abajo quiere decir que la curva gira a derecha, en el caso contrario la curva gira hacia la izquierda.

⁷ Magna Sirgas, Sistema de coordenadas planas para Colombia

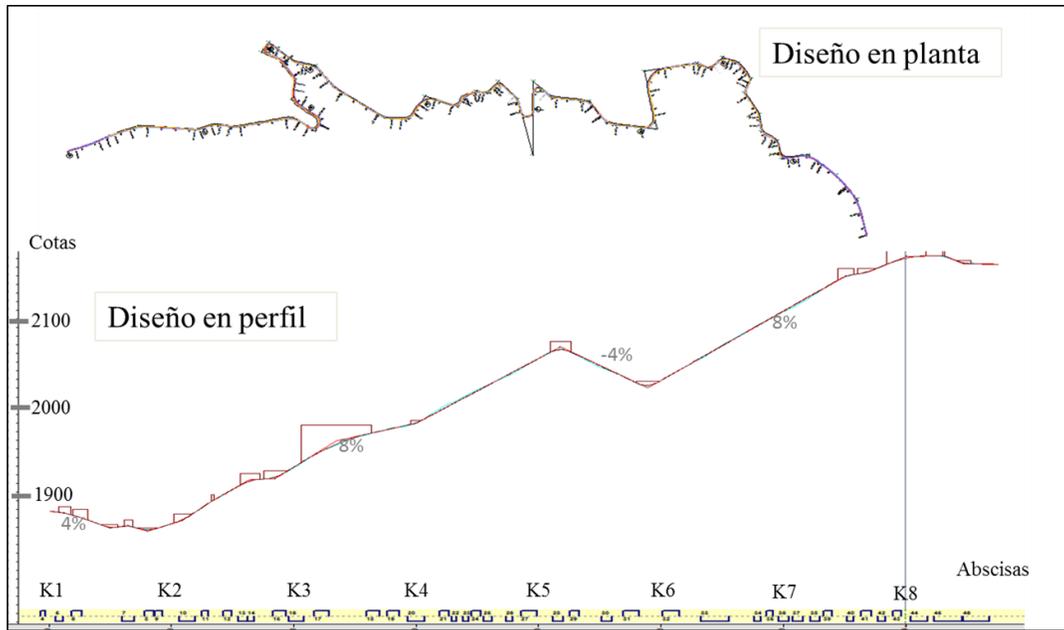


Figura 5. Diseño en planta y perfil del tramo de estudio – TOPO3

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Datos geométricos de las curvas horizontales del tramo de estudio.

PI#	Delta g,m,s,ID	Radio Entrada m	Longitud Total m	Entretangente m	PI#	Delta g,m,s,ID	Radio Entrada m	Longitud Total m	Entretangente m
1	7,44,24 I	1284	173		24	60,11,48 I	70	74	26
2	4,8,55 D	878	64	61	25	95,38,29 D	43	72	23
3	23,19,44 D	335	136	112	26	31,5,8 D	101	55	114
4	21,28,58 I	98	37	332	27	164,32,19 I	44	126	70
5	26,36,29 D	124	58	89	28	131,45,39 D	41	87	129
6	18,25,35 I	242	78	72	29	36,0,38 I	122	77	48
7	43,0,1 D	137	103	330	30	46,0,50 D	110	88	185
8	97,44,23 I	47	80	79	31	45,59,12 I	159	128	92
9	81,45,31 I	41	59	7	32	108,27,50 I	70	133	194
10	64,48,4 D	115	130	143	33	93,25,17 D	141	230	181
11	44,43,16 I	67	52	53	34	33,22,55 D	90	52	207
12	35,19,35 I	118	73	122	35	68,26,54 I	45	54	44
13	107,19,59 D	41	73	51	36	62,55,33 D	78	86	44
14	92,13,6 D	41	58	0	37	32,21,43 D	143	81	31
15	30,46,5 I	194	104	153	38	65,12,47 D	68	77	61
16	42,27,30 D	170	126	25	39	61,5,4 I	68	72	32
17	18,23,25 I	367	118	82	40	27,42,37 D	109	53	123
18	28,13,13 I	214	105	308	41	54,29,31 I	82	78	62
19	59,25,57 I	95	99	67	42	49,20,18 D	76	65	55
20	74,14,25 D	102	132	71	43	86,43,47 I	47	71	55
21	82,7,50 I	52	75	128	44	44,50,14 D	179	140	75
22	41,39,46 D	53	39	19	45	13,17,4 D	1016	236	51
23	30,39,53 D	81	43	58	46	26,4,54 D	474	216	5

Fuente: elaboración propia

4.2.2 Recopilación de datos de velocidad.

Después de seleccionado el corredor para realizar el trabajo de campo; se realizó el análisis para definir el método para determinar la velocidad de operación en ciertos puntos requeridos. Se realizó una recopilación basada en la revisión de literatura, la cual se describe en la Tabla 8, que muestra los métodos utilizados por distintos autores y tipos de velocidad encontrada: continua o puntual según el mecanismo de medición.

Tabla 8. Métodos utilizados para medir la velocidad de operación

AUTOR	PAÍS	MECANISMO	TIPO DE MEDIDA
Montella A. et al.	Italia	Simuladores de conducción	Velocidad continua
Pérez Zuriaga et al.	España	GPS	Velocidad continua
Bella and Agostini	Italia	Simuladores de conducción	Velocidad continua
Abbas et al.	Malasia	Equipo Láser	Puntual
Hassam	Canadá	Radar	Puntual
Krammes	USA	Radar	Puntual
Bella et al.	Italia	Vehículo instrumentado	Puntual
Memmon	Pakistán	Vehículo instrumentado	Puntual
Asakura	Japón	GPS	Velocidad continua

Fuente: (Montella, Galante, Mauriello, & Aria, 2015), modificado

Para el estudio, se optó por realizar la medición de velocidades por medio de radar; el cual detecta de forma puntual la velocidad de los vehículos en movimiento desde un puesto fijado a una distancia aproximada de 50m. La medición se realizó a aquellos vehículos cuyo tránsito fuera a flujo libre. Las medidas se efectuaron en unos puntos específicos según la curva de análisis; con la intención, de hacer iterativo el proceso en otras curvas. Los puntos a medir se ubicaron de la siguiente manera: primero en el inicio del tramo recto anterior (PTant), luego al inicio de la curva (PC), posteriormente en la mitad (Pm) y al salir de la curva (PT) y finalmente, al inicio de la siguiente curva (PCsgte). Para cada elemento curvo de análisis, se requerían 5 personas, cada una con un dispositivo de radar, debidamente ubicadas, de tal forma que no fueran fácilmente visibles.

El primer tramo de prueba, fue en el kilómetro 10 de la vía Popayán-Piedamó, sector El Cofre, siendo esta una vía primaria con un alto flujo vehicular. La Figura 6. Tramo de prueba piloto describe la localización del tramo piloto de prueba de medición de velocidades sobre una imagen de Google-Earth y a su lado el trazado realizado en TOPO3.

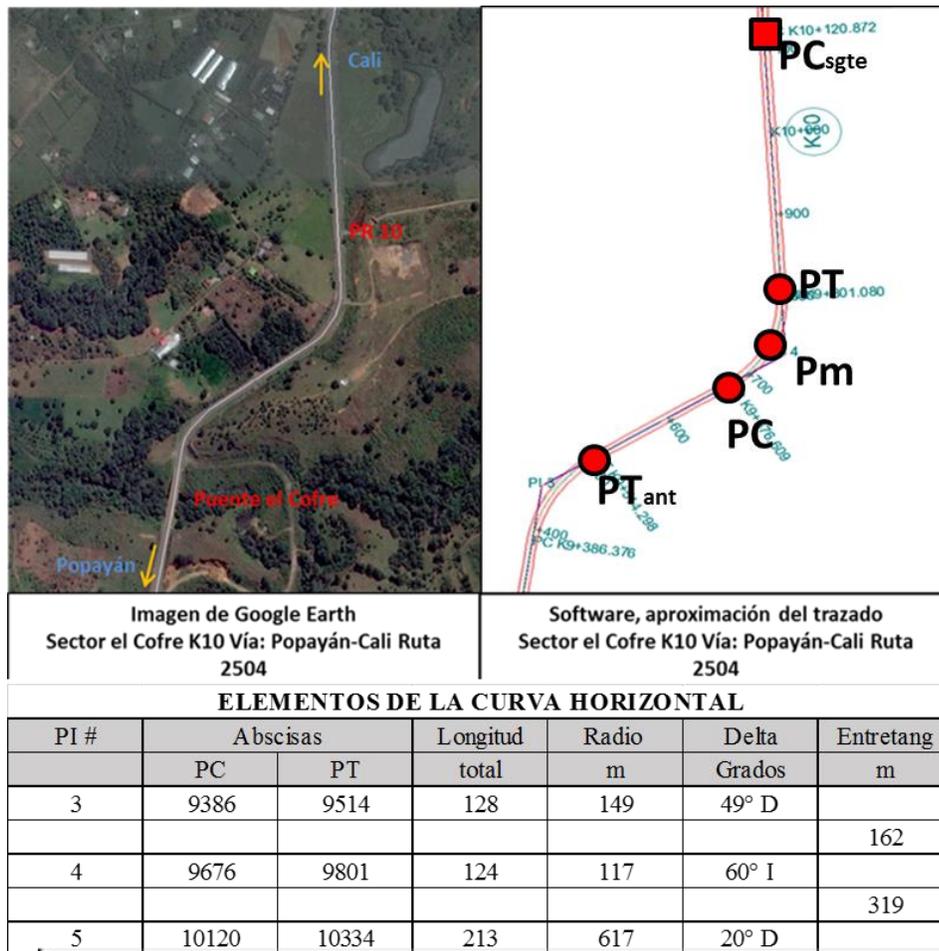


Figura 6. Tramo de prueba piloto
Fuente: elaboración propia

El método no se consideró adecuado, ya que se altera la información al ver los usuarios en campo las mediciones directas con radar. Algo importante que marcó la prueba piloto, fue que los vehículos pesados tienen una variación grande con respecto a los livianos, por tal razón el estudio se basó solamente en vehículos livianos.

Adicional a lo anterior, el proceso de captura que se realizaba por curva de análisis era engorrosa; se requerían, distintos elementos curvos con diferentes características geométricas, por tanto, se demandaba más personal de trabajo y/o más tiempo de dedicación. En definitiva, el método de medición de velocidades con radar, fue rechazado para captura de datos de la presente investigación.

Considerando lo expuesto, se optó por realizar la captura de velocidades de operación, mediante un receptor de posicionamiento global (GNSS⁸), comúnmente conocido como GPS. El método consistió en hacer un recorrido con el receptor GPS en modo dinámico, a lo largo de todo el segmento seleccionado (desde el km 1 al 8) en el sentido del abscisado y luego en contrasentido, en un vehículo cuya circulación se hiciera a flujo libre.

Con el objeto de bloquear variables en la investigación, se utilizó el mismo receptor para todos los recorridos, igualmente el mismo vehículo y las rutas se realizaron en tiempo seco y a la luz del día. Las pruebas se desarrollaron con diferentes conductores, en adelante denominados *sujetos*, quienes colaboraron con el proyecto y que se consideraron conductores cotidianos en vías rurales, con el común de no transitar el segmento de ensayo con frecuencia.

Para certificar la validez de las velocidades obtenidas con el receptor GPS, se registraron algunos datos puntuales durante la marcha utilizando un velocímetro digital; además, se tomaron unas medidas de velocidad del vehículo con radar en ciertos puntos de la carretera referenciados mediante su abscisado; se realizó la comparación de estas 3 velocidades, evidenciando una diferencia no significativa, entre los resultados obtenidos por cada método. Se debe agregar, que durante la toma de información con el GPS, debía este registrar un PDOP⁹ máximo de 5 (en el experimento se obtuvo siempre bajo 2).

Como información adicional al tipo de carretera seleccionado, se especifica el tránsito promedio diario (TPD) para el año de estudio en la vía Popayán-Totoró.

El TPD, se establece mediante conteos vehiculares en el sector realizados en ciertos días del año y que reflejan el tránsito anual; esta información es tomada y registrada por el Instituto Nacional de Vías INVIAS, publicándola en la página oficial o en cartillas de distribución abierta y se utiliza, para determinar el crecimiento anual del parque automotor, la determinación de la capacidad de las carreteras, la proyección vehicular para futuras ampliaciones o rectificaciones o apertura de otras vías alternas, entre otros estudios. La vía utilizada en la investigación, está monitoreada a través de la estación de conteo 290 del INVIAS, que registra información entre el Km 0 de Popayán-y El Crucero Km 16 (Vía a Totoró).

La información existente de la estación 290, data actualmente desde el año 1968 al 2017. El trabajo de toma de información se realizó a finales del año 2017; por lo tanto, no estaba la

⁸ GNSS, Sistema satelital de navegación global.

⁹ PDOP, Dilución de la precisión de la posición (3D) (Sistema de navegación global)

información del 2017 aún; es por esta razón que se trabajó para determinar el tamaño de la muestra con el último dato registrado que fue del 2015, (Véase registro total en la Tabla 9).

Tabla 9 TPD Popayán - El Crucero (Totoró) Estación de conteo 290, INVIAS

Año	TPD	%AUTO	%BUS	%C2P	%C2G	%C3-C4	%C5	%C6
1980	162	50	18	15.35	15.27	1.02	0.29	0.07
1981	158	49	16	16.79	16.7	1.11	0.32	0.08
1982	165	46	19	16.79	16.7	1.11	0.32	0.08
1983	171	54	14	15.35	15.27	1.02	0.29	0.07
1985	184	65	12	11.03	10.98	0.73	0.21	0.05
1986	196	58	13	13.91	13.84	0.92	0.26	0.07
1987	201	57	13	14.39	14.32	0.95	0.27	0.07
1988	141	52	26	10.55	10.5	0.7	0.2	0.05
1989	165	49	14	17.74	17.66	1.18	0.34	0.08
1990	220	54	13	15.82	15.75	1.05	0.3	0.08
1991	190	57	10	15.82	15.75	1.05	0.3	0.08
1992	204	64	11	11.98	11.93	0.8	0.23	0.06
1993	219	61	13	12.46	12.41	0.83	0.24	0.06
1994	286	67	11	10.55	10.5	0.7	0.2	0.05
1995	297	60.4	10.9	8.09	19.52	0.5	0.37	0.22
1997	443	54	10	10.16	24.48	0.62	0.47	0.27
1998	452	67	8	7.05	17	0.43	0.33	0.19
1999	547	68	11	5.93	14.28	0.36	0.27	0.16
2000	611	69	7	6.77	16.32	0.42	0.31	0.18
2002	650	68	11	5.93	14.28	0.36	0.27	0.16
2003	709	78	5	4.79	11.56	0.3	0.22	0.13
2004	459	66.3	8.9	6.99	16.87	0.43	0.32	0.19
2005	760	81.2	5.87	4.53	8.27	0	0	0.13
2006	412	79	5	5.5	10.25	0.25	0	0
2007	1513	83.07	5.03	5.09	6.48	0.33	0	0
2008	772	84.12	4.86	4.33	6.56	0.13	0	0
2009	1003	83.54	4.24	4.14	4.75	2.93	0.1	0.3
2010	1177	74.92	6.77	6.25	5.9	4.51	0.09	1.56
2011	995	84.33	4.37	3.97	5.7	1.53	0.1	0
2012	949	79.35	3.23	8.49	8.17	0.43	0.22	0.11
2013	989	84.55	2.81	5.7	6.03	0.66	0.25	0
2014	1337	81.37	4.35	4.81	8.77	0.62	0.08	0
2015	1440	85	3	4	7.4	0.5	0.1	0

Fuente: Cartilla TPD-INVIAS 2018

La Tabla 9, presenta para cada año el TPD asentado en ambos carriles con la distribución de tipo de vehículos que circulan por este sector.

La Figura 7, describe gráficamente el TPD del sector, en función del año y del tránsito promedio diario, considerado en los dos carriles.

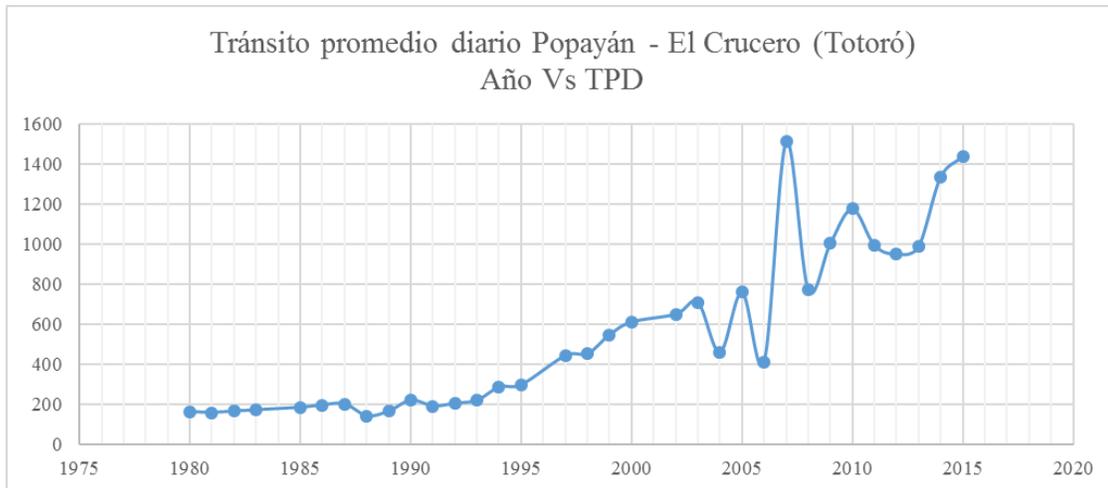


Figura 7. TPD, año Vs Número de vehículos
Fuente: elaboración propia

4.2.3 Definición del tamaño de la muestra

Después de seleccionado el tramo de estudio, se ha establecido para la elección del tamaño de la muestra, considerando que en esta carretera no se han hecho estudios de esta índole; se ha utilizado la expresión propuesta por el Manual de Diseño Geométrico para carreteras del año 1998 de Colombia.

$$n = (KS / E)^2$$

n= Tamaño máximo de la muestra

K= Constante correspondiente al nivel de confiabilidad deseado (90%, Z= 1.65)

S= Desviación normal de las muestras de velocidades (8 kph)

E = Error normal permitido en la estimación de la velocidad media (3.2kph)

$$n = (1.65 * 8 / 3.2)^2 = 17$$

Dando como resultado un n = 17; por tanto, la cantidad de sujetos requeridos es 17.

Finalmente, se realizó la captura de información utilizando los 17 sujetos, los cuales circularon con el GPS cartográfico en el vehículo seleccionado atravesando a flujo libre la vía escogida como tramo de estudio, atravesando 7 km para un total de 46 curvas por sentido. Se enfatiza, que el recorrido se realizó en ambos sentidos, con el propósito de analizar las curvas consideradas distintas en algunas de sus características en un sentido con respecto al otro.

Las coordenadas fueron tomadas cada 1 segundo obteniendo un valor aproximado de 15000 lecturas GPS; la información fue registrada en forma independiente por sujeto y por sentido.

La Figura 8, resume las actividades realizadas en el proceso del trabajo de campo realizado para la toma de información de los datos requeridos para la investigación.

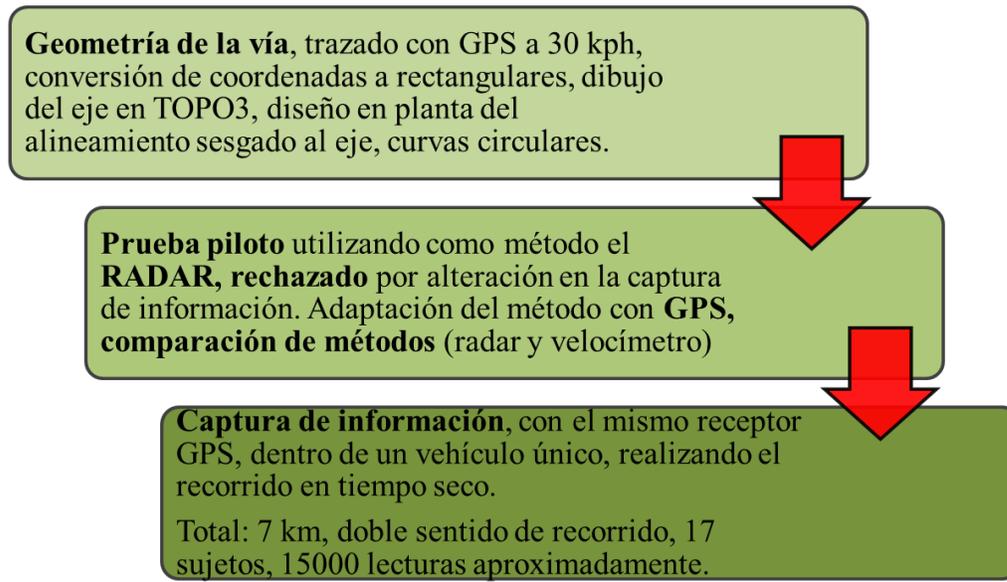


Figura 8. Resumen de la recopilación de datos geométricos y de velocidades
Fuente: elaboración propia

4.3 PROCESAMIENTO DE LAS VELOCIDADES TOMADAS EN CAMPO

Para comenzar; se parte, de que la información obtenida en campo y adaptada a Excel, tiene el siguiente formato: “Identificador, Latitud, Longitud, Cota”, por cada recorrido hecho por un sujeto en un solo sentido, en promedio 450 capturas. Estos datos corresponden a la lectura grabada por el GPS cada 1 segundo.

En el programa TOPO3, se realizó la conversión de las coordenadas quedando el siguiente formato: “Punto, Norte, Este, Altitud”; resultando una polilínea, al unirlos en forma secuencial. Luego, esta línea se sobrepuso sobre la geometría base del trabajo, logrando obtener la abscisa de

cada uno de los puntos leídos con el GPS; obteniendo, un nuevo formato: “Abscisa, Velocidad” (Figura 9. Acondicionamiento de la información, coordenadas a Velocidades.).

Punto	Este	Norte	Altitud		ABSCISA	VELOCIDAD
1	1059436.13	769422.025	1896.08		471	46
2	1059436.06	769422.047	1896.05		484	47
3	1059435.99	769422.058	1896		497	48
4	1059435.93	769422.091	1895.97		511	50
5	1059435.87	769422.135	1895.96		525	51
6	1059435.84	769422.135	1895.95		539	52
7	1059435.84	769422.135	1895.92		553	52
8	1059435.85	769422.135	1895.93		568	52
9	1059435.86	769422.113	1895.92		583	53
10	1059435.88	769422.102	189		598	55



Cálculo de velocidad
Dist= (m)/1 seg

Figura 9. Acondicionamiento de la información, coordenadas a Velocidades.
Fuente: elaboración propia

Es de aclarar, que la velocidad es calculada mediante la distancia entre dos abscisas, en un tiempo de recorrido de 1 segundo. Este procedimiento se realizó para cada sujeto y de forma independiente para el recorrido en el sentido del abscisado y en contrasentido.

Como el objeto propuesto consiste en encontrar la velocidad de operación en los puntos de interés de cada una de las curvas horizontales (Pant, PC, Pm, PT), y los datos arrojados por el GPS son secuenciales, pero no coinciden con los puntos de las curvas mencionados; es por este motivo, que se requiere definir la velocidad en esos puntos a través de interpolación de los datos en las abscisas observados. Este proceso se muestra en la Figura 10, en donde en una curva de análisis, se tienen los puntos GPS (en color rojo), por la geometría se tienen los puntos de inicio, medio y terminación de la curva y las flechas azules los valores de velocidad necesarios de calcular según la abscisa de cada punto de interés de la curva conformando una base de datos con el siguiente formato: “Descripción del punto, Abscisa, Velocidad”.

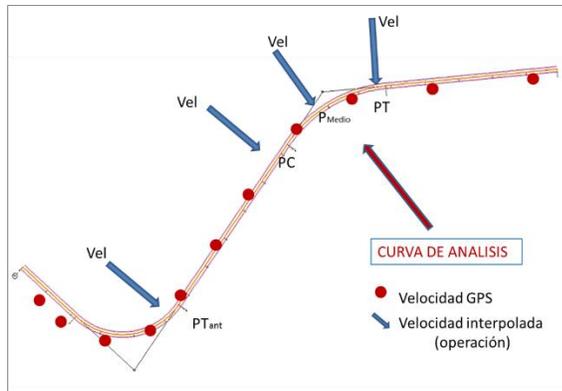


Figura 10. Velocidades halladas por interpolación en puntos específicos
 Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se dibujaron los perfiles de velocidades (*Abscisa Vs Velocidad*) por sujeto y por recorrido utilizando la herramienta TOPO3; en total, 34 perfiles. Se observa en ellos, que el aumento de velocidad está representado por la pendiente positiva o negativa del perfil. También se puede apreciar que para cada sujeto de cada sujeto cual fue su velocidad máxima y mínima en el recorrido. De igual manera se observa cuando ocurre un cambio brusco de velocidad, determinado por el cambio de pendiente de positiva a negativa o viceversa. En función de la localización de las curvas, que están dadas por las abscisas, se puede apreciar con qué velocidad se entra a cada curva. La Figura 11, describe 2 perfiles tipo de sujetos distintos; la figura resalta en las abscisas (eje x) el valor de cada kilómetro y la velocidad (eje Y) resaltando los valores de 30, 50 y 70 kph.

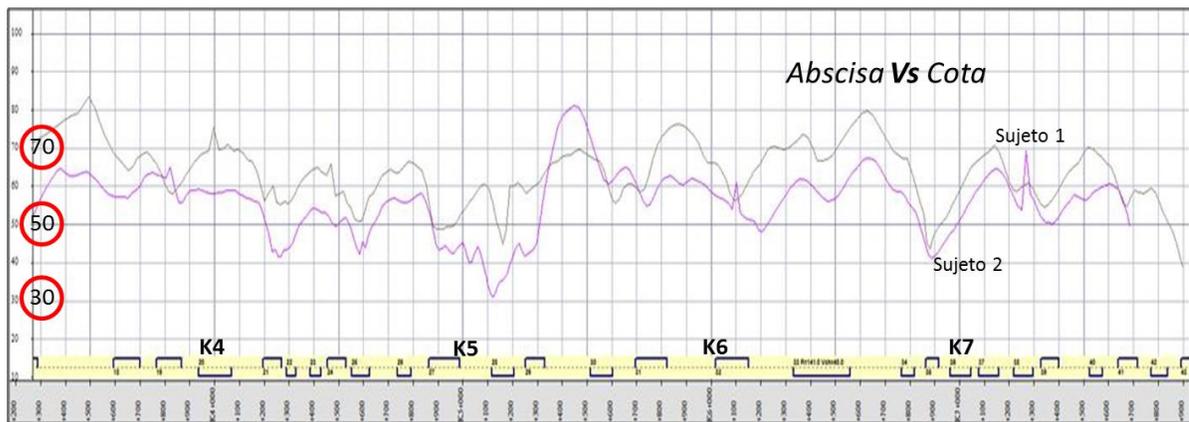


Figura 11. Perfil de velocidad de dos sujetos, Fuente: elaboración propia sobre TOPO3
 Fuente: elaboración propia

La Figura 12, presenta el resumen del procesamiento de toma de velocidades y a partir de los resultados obtenidos, de las velocidades y sus perfiles para cada sujeto, sigue la siguiente fase de análisis de los datos.

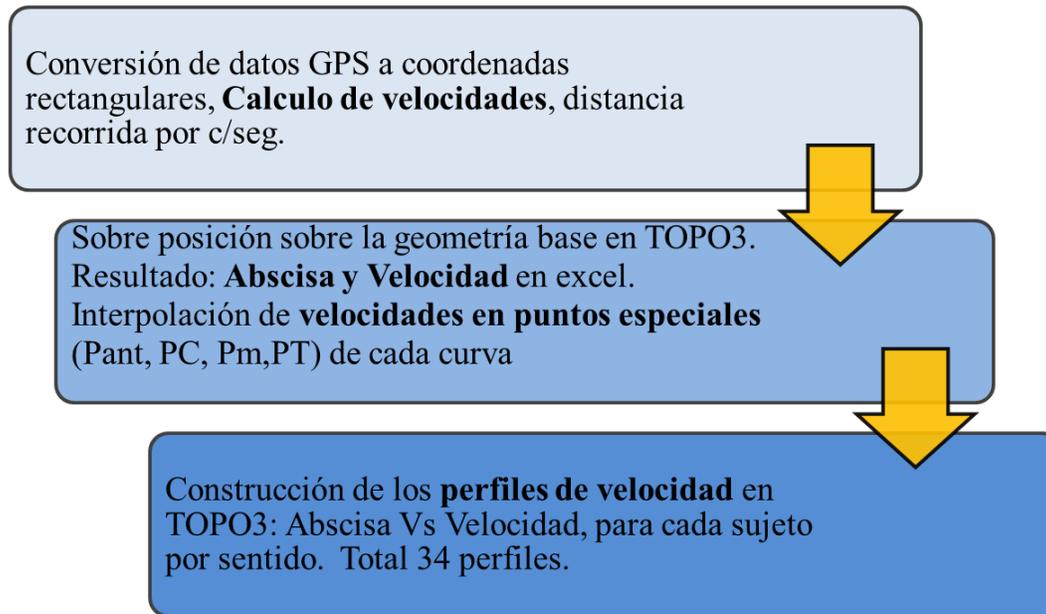


Figura 12. Resumen procesamiento de toma de velocidades
Fuente: elaboración propia

4.4 GENERACIÓN DE LA BASE DE DATOS

En esta sección, se puntualiza el proceso elaborado para encaminar la información obtenida en los pasos anteriores como insumo y así lograr el objeto de la presente investigación.

De las 46 curvas que hacen parte del tramo de prueba, 28 tienen características de terreno montañoso (Radios entre 40 y 100m y/o deflexiones entre 80° y 120° y/o pendientes entre 7% y 9%), según la *Tabla 6. Clasificación del terreno según la geometría de la vía (Terreno montañoso)*. A criterio propio, se seleccionaron, además aquellas curvas con entretangencias menores a 83 m (Esta distancia se refiere a la entretendencia mínima en curvas circulares de distinto sentido recorrida en 5 segundos con una velocidad de diseño de 60 km/h “asumiendo esta velocidad como promedio en terrenos montañosos”).

La Tabla 10, presenta las curvas seleccionadas que cumplen con alguno de los parámetros propios de carreteras en terreno montañoso. De acuerdo a la geometría de la vía, se divisaron, además dos pares de curvas con entretangencia casi nula, y radios similares; por tal razón, se asumió cada par como una sola; son ellas la curva 8 y 9 (tomada en adelante como la curva 8) y la 13 y 14 (tomada en adelante como la curva 13).

Tabla 10. Curvas seleccionadas para el análisis de estudio

GEOMETRÍA DE LA VIA							GEOMETRÍA DE LA VIA						
Curva	Abscisa	Radio	D	P %	Lc	ETant	Curva	Abscisa	Radio	D	P %	Lc	ETant
8	2068	47	180	3	145	98	111	2198	67	45	-9	52	101
10	2251	115	65	8	130	40	112	2303	118	35	-6	73	167
11	2425	67	45	9	52	232	113	2498	39	199	-8	131	39
12	2549	118	35	6	73	70	119	3701	95	60	-3	99	68
13	2832	39	199	8	131	116	120	3866	102	74	-8	132	54
19	3937	95	60	3	190	37	121	4069	52	82	-8	75	172
20	4197	102	74	8	132	97	122	4272	53	42	-8	39	48
21	4290	52	82	8	75	25	123	4329	81	30	-8	43	133
22	4386	53	42	8	39	150	124	4430	70	60	-8	74	35
23	4455	81	30	8	43	59	125	4529	43	95	-8	72	31
24	4552	70	60	8	74	31	126	4623	101	31	-8	55	208
25	4737	43	95	8	72	159	127	4792	44	164	-8	126	55
27	5118	44	165	8	126	102	128	4989	38	132	-8	87	148
28	5253	38	132	8	87	56	129	5205	122	36	-7	77	62
30	5695	110	46	-7	88	104	130	5330	110	46	7	88	210
32	6331	70	108	8	133	137	132	5823	70	108	-8	133	146
33	6767	141	93	8	230	90	133	6150	141	93	-8	230	79
34	6853	90	33	8	52	84	134	6561	90	33	-8	52	394
35	6962	45	68	8	54	82	135	6820	45	68	-8	54	82
36	7079	78	62	8	86	37	136	6917	78	62	-8	86	52
38	7329	68	65	8	77	41	138	7159	68	65	-8	77	79
39	7524	68	61	8	72	169	139	7298	68	61	-8	72	43
40	7639	109	27	4	53	117	140	7402	109	27	-4	53	232

Fuente: elaboración propia

Se realizó el perfil de velocidades de cada curva, para visualizar el comportamiento de los sujetos desde el inicio del tramo recto anterior a la curva de análisis, es decir, desde el punto final de la curva anterior; hasta, el final de la curva que se está examinando.

La Figura 13 presenta, los primeros perfiles de velocidad realizados para cada una de las curvas; observándose que no era posible realizar una comparación entre el comportamiento de los sujetos, ya que cada uno de ellos, sale del elemento anterior con una velocidad distinta. Lo mismo sucede, con la geometría de la curva; específicamente con la longitud, en donde se presentan dimensiones distintas sin medio de comparación en el comportamiento de las velocidades para curvas de diferente longitud.

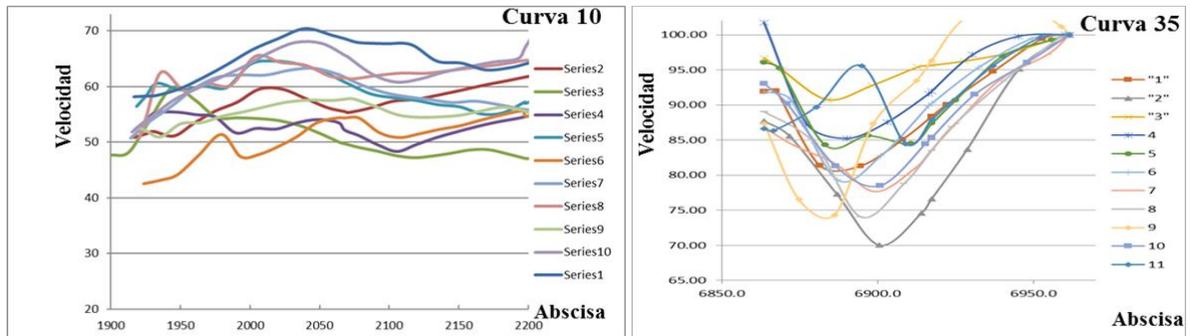


Figura 13. Perfiles de velocidad de todos los sujetos por curva. Velocidad kph Vs Abscisa

Fuente: elaboración propia

Con el objeto de normalizar los resultados, se asumió que el sujeto al salir de la curva anterior (PT_{ant}), inicia el recorrido con una velocidad del 100% y que, durante el valor de la velocidad obtenido durante su travesía por la entretangencia y la curva de observación, se especifique como porcentaje de la de inicio. Al obtener porcentajes mayores al 100%, indica que la velocidad ha aumentado, en caso contrario que la velocidad ha disminuido con respecto a la velocidad de inicio en el inicio del tramo recto anterior. Así todos los sujetos inician con una velocidad de 100% en todas las curvas.

En cuanto a tener un marco de referencia entre la geometría de las curvas; se valoró, que la longitud de la curva horizontal (L_c), tuviera un valor de 100% y que la longitud de la entretangencia anterior, estuviera en relación a esa longitud. Siendo así, el 0% corresponde al punto de comienzo de la curva (PC), el 50% al punto medio (Pm) y el 100% al punto final (PT), los valores negativos de porcentaje serán correspondientes a la entretangencia. La

Figura 14, presenta un modelo del perfil de velocidad con el fin de comprender la correspondencia de cada valor relativo.

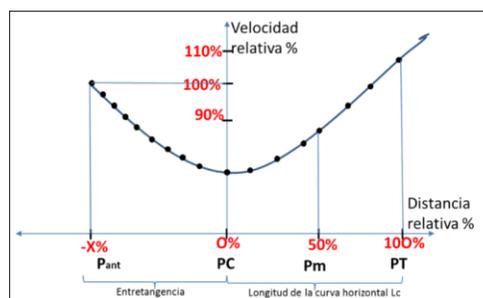


Figura 14. Perfil de velocidad tipo, por curva (Velocidad relativa Vs Distancia relativa)

Fuente: elaboración propia

En la Figura 15, se pueden observar los perfiles de velocidad de algunas curvas considerando velocidad relativa Vs Distancia relativa de todos los sujetos. En el anexo 1 se exponen todos los perfiles elaborados de las curvas analizadas en ambos sentidos (46 en total); las cuales revelan unas tendencias en las trayectorias, observando que los sujetos siguen un modelo de acuerdo a las características particulares de cada curva.

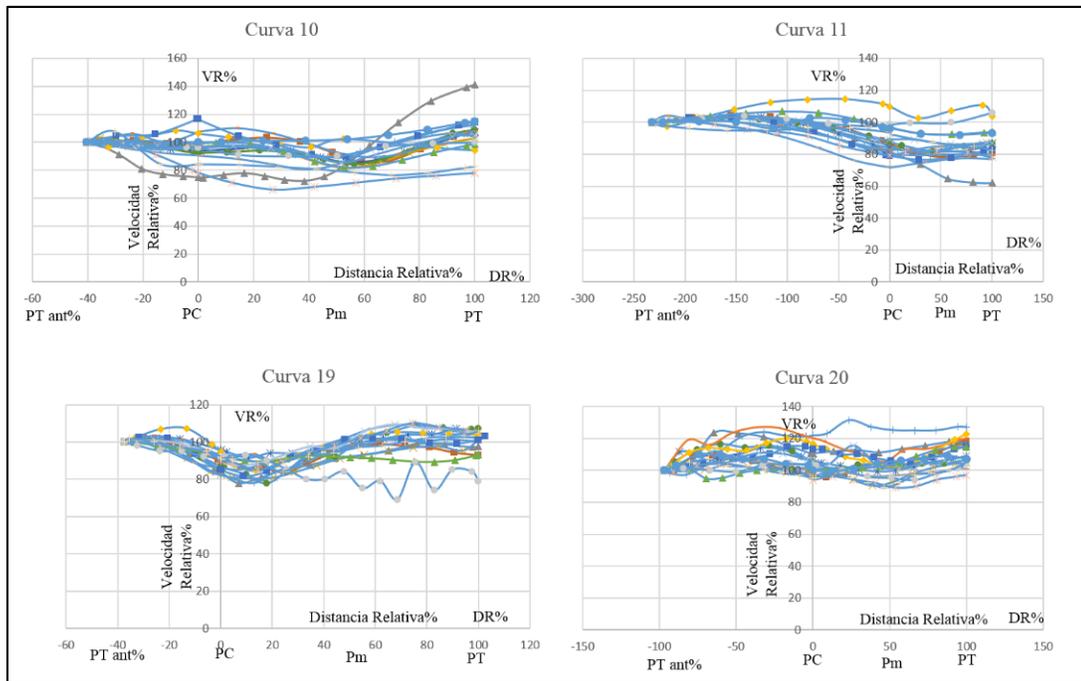


Figura 15. Modelos de perfiles de Velocidad Vel. Relativa % Vs Dist. Relativa %
Fuente: elaboración propia.

Siguiendo este concepto, se realizó una base de datos con la información geométrica del interés del proyecto, las velocidades relativas y las distancias relativas. Esta base de datos cuenta con un poco más de 9900 registros; Tabla 11, expone un ejemplo del formato. Se resalta en ella (en rojo), la detección del punto de comienzo del tramo recto anterior PT_{ant} , cuando la velocidad relativa (VR%) es igual a 100; el punto de comienzo de la curva de análisis PC, cuando la distancia relativa (DR%) es igual a 0 y el punto de terminación de la curva PT, cuando la distancia relativa (DR%) es igual a 100%.

Tabla 11. Formato de la base de datos de análisis del proyecto

Curva	Sujeto	Abscisa	DR %	VR %	Velocidad	Radio	Deflexión	Pendiente	Lc	ETant
38	1	7329	-41	100	53	68	65	8	77	41
		7320	-28	102	54	68	65	8	77	41
		7305	-9	102	54	68	65	8	77	41
		7298	0	100	53	68	65	8	77	41
		7290	10	98	52	68	65	8	77	41
		7276	28	91	48	68	65	8	77	41
		7263	45	89	47	68	65	8	77	41
		7250	62	93	49	68	65	8	77	41
		7236	80	99	52	68	65	8	77	41
		7221	99	104	55	68	65	8	77	41
		7220	100	104	55	68	65	8	77	41

Fuente: elaboración propia

Finalmente, se presenta el resumen de los análisis de datos, Figura 16.

Con esta base de datos y de acuerdo a los objetivos planteados se despliegan los resultados obtenidos en el siguiente capítulo; enfocados específicamente en la validación del método del MDG2008 para determinar la velocidad específica en las curvas horizontales y el planteamiento de cuál sería el mecanismo para determinarla considerando los terrenos montañosos en Colombia.

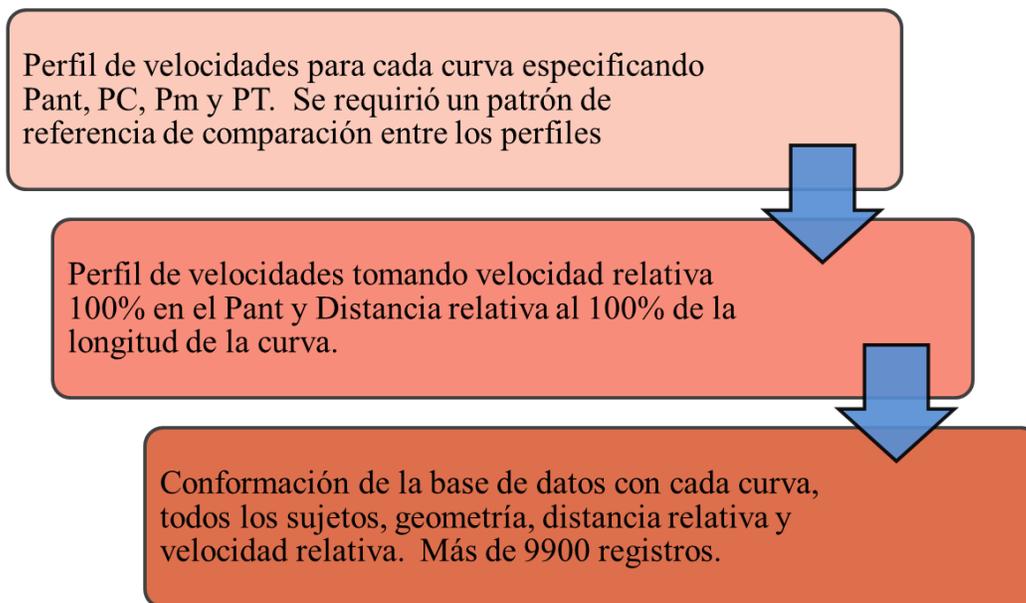


Figura 16. Resumen generación bases de datos.

Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS

De acuerdo a los objetivos formulados en la propuesta de investigación, se expone en el presente capítulo los resultados obtenidos:

5.1 VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE LA DESIGNACIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE UNA CURVA HORIZONTAL, DEFINIDA EN EL MANUAL DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS DE COLOMBIA.

Para comenzar, se trae a mención el procedimiento que indica el INVIAS (2008), para asignar la velocidad específica en una curva horizontal; posteriormente, se realiza una equivalencia de los criterios de la norma, con los resultados obtenidos durante la observación de campo y su procesamiento; finalmente, se analizan los resultados obtenidos presentando un resumen de observación.

5.1.1 Procedimiento de asignación de la velocidad específica en el Manual

El mecanismo de asignación de la velocidad específica que determina el manual, se encuentra resumido en la

Tabla 12 (tabla 2.2 del manual). Ésta considera la velocidad de diseño o velocidad de tramo para valores menores o iguales a 50 km/h y para valores mayores a 50 km/h; para cada clasificación se especifican cinco casos los cuales están en función del segmento recto anterior “entretangencia” (ET_{ant}) y de la deflexión de la curva de estudio (Δ). Para utilizar la tabla se usa como primer insumo, el valor de la velocidad de diseño; estableciendo, si es menor o igual a 50 kph o si es mayor a este valor; luego, se debe estimar la velocidad con la que sale el vehículo de la curva anterior (PT_{ant}) es decir, velocidad del tramo recto anterior que puede ser igual a la velocidad del tramo, superada en 10 o en 20 kph (Hay 3 opciones de valor de esa velocidad). Adicional, se debe definir el valor del segmento recto anterior; si la velocidad de diseño es menor o igual de 50 kph, los rangos de la entretangencia serán menor de 70, entre 70 y 250, entre 250 y 400 y mayor de 400 m. Para el caso de velocidad de diseño mayor de 50 kph, los rangos de entretangencia están dados por longitudes menores de 150, entre 150 y 400 y mayores de 400 m.

Luego, si esas entretangencias están entre 70 y 250 m para velocidad de diseño menor o igual de 50 kph o entre 150 m y 400 m para velocidades de diseño mayores, debe especificarse si la deflexión es menor o mayor de 45°.

Tabla 12. Asignación de velocidad específica – que se encuentra en la Tabla 2.2 del Manual de diseño Geométrico de Colombia - 2008

Velocidad Específica de la Curva horizontal anterior V_{CH} (km/h)	Velocidad de Diseño del Tramo ($V_{TR} \leq 50$ km/h)					Velocidad de Diseño del Tramo ($V_{TR} > 50$ km/h)				
	Longitud del Segmento recto anterior (m)					Longitud del Segmento recto anterior (m)				
	$L \leq 70$	$70 < L \leq 250$		$250 < L \leq 400$	$L > 400$	$L \leq 150$	$150 < L \leq 400$		$400 < L \leq 600$	$L > 600$
$\Delta < 45^\circ$		$\Delta \geq 45^\circ$	$\Delta < 45^\circ$				$\Delta \geq 45^\circ$			
V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$	V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
CASO	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Fuente: Manual de diseño Geométrico de Colombia – 2008

A continuación, se muestra el siguiente ejemplo de aplicación de la Tabla 12, para calcular la velocidad específica de una curva según la siguiente información:

Se desea calcular la velocidad específica de una curva, si la velocidad de diseño en el tramo es de $V_{TR} = 40$ kph y la velocidad específica del elemento anterior es igual a $V_{CH} = 50$ kph; la entretangencia entre la curva de análisis y la anterior es de 100 m y la deflexión de la curva de análisis es de 80°.

El procedimiento será explicado mediante la Figura 17; en donde con una $V_{TR} = 40$ kph, se selecciona entre la sección izquierda o derecha de la Tabla 12 “paso 1”, con la V_{CH} anterior = 50 kph, se determina a cuánto equivale con respecto a la velocidad del tramo ($V_{TR} + 10 = 50$ kph) “paso 2”; posteriormente, se clasifica el valor de la entretangencia de 100m, con L entre 70 y 250m “paso 3”, a continuación, para una deflexión de 80°, se escoge la columna de delta mayor o igual a 45° “paso 4”; finalmente, se escoge el valor que corresponde a la velocidad específica: $V_{CH} = V_{TR}$ “paso 5”. Para el ejercicio, la velocidad específica V_{CH} de la curva en cuestión es de 40kph.

Velocidad Específica de la Curva horizontal anterior V_{CH} (km/h)	Velocidad de Diseño del Tramo (V_{TR}) ≤ 50 km/h 1				
	Longitud del Segmento recto anterior (m)				
	$L \leq 70$	$70 < L \leq 250$		$250 < L \leq 400$	$L > 400$
		3 100 kph $\Delta < 45^\circ$	$\Delta \geq 45^\circ$ 4 $\Delta = 80^\circ$		
V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
2 50 kph $V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	V_{TR}	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	$V_{TR} + 20$	5 40 kph $V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 10$	$V_{TR} + 20$
CASO	1	2	3	4	5

Figura 17. Ejemplo para determinar la velocidad específica.

Fuente: elaboración propia

5.1.2 Asimilación de la base de datos obtenida al procedimiento de asignación de velocidad específica del manual.

Con el fin de realizar la validación de la tabla del manual

Tabla 12; en la base de datos, se realizó un barrido de todos los registros ordenando la información de tal manera que se ajustaran los parámetros de: “entretangencia anterior y deflexión”.

Se realizó el ejercicio de igual manera para velocidad de tramo menor o igual de 50 kph ($V_{TR} \leq 50$ kph) y para velocidades mayores ($V_{TR} > 50$ kph), se consideraron, los dos sectores de la tabla (Lado izquierdo $V_{TR} \leq 50$ kph y lado derecho $V_{TR} > 50$ kph).

Para el primer sector, se catalogaron los registros estipulando: tramo recto anterior con longitud menor a 70 m y longitudes entre 70 y 250 m, en este rango último, se subdividió la información clasificando aquellos registros en donde la deflexión fuera mayor o menor de 45° . Con estas batidas se calculó la velocidad relativa promedio para cada clasificación.

Lo mismo se hizo para las velocidades mayores a 50 kph, primero para longitudes del tramo recto anterior menores a 150 m y luego para aquellos entre 150 y 400 m; además, se clasificó en este último rango de longitud, la información para las curvas con ángulos de deflexión menores de 45° y mayores a este valor.

En ninguno de los datos tomados se tuvieron entretangencias mayores de 400 m (Porque en terrenos montañosos no son comunes entretangencias que superen estos valores); razón por la cual, esos casos que considera la

Tabla 12, no tuvieron referencia de comparación. Este procedimiento se hizo en cada punto (PT_{ant} , PC, Pm y PT) de todas las curvas.

Considerando, que el manual realiza el análisis de variación de la velocidad partiendo del tramo recto anterior con un valor igual a la velocidad del tramo en +10 o +20 kph; y no precisa más opciones de información. La mejor forma encontrada de comparar los resultados de los datos de la investigación con los valores que sugiere el manual; fue asumiendo que, en el manual, el vehículo transite con un equivalente al 100% de velocidad en el inicio del tramo recto anterior y que, al aumentar en 0, 10 y 20 kph, se haga con respecto a esa velocidad inicial. Asumiendo un promedio de Velocidad de 60 kph como V_{TR} , al incrementarla en un valor de 10 kph, se estaría hablando de un aumento del 16.6%, es decir la velocidad está aumentando un 16.6% con respecto a la velocidad de inicio en el tramo recto. En el caso de incrementarse la V_{TR} en 20 kph, el incremento de la velocidad relativa será de 33% entre el inicio de la curva y el inicio del tramo recto anterior.

Al realizar la descripción en forma gráfica, como se muestra en Figura 18, en donde se representa el comportamiento de la velocidad del vehículo según la

Tabla 12 (Tabla 2.2 del Manual); al pasar el vehículo desde el inicio del tramo recto anterior hasta el paso por la curva, en donde comienza con una velocidad (V_{TR} ó $V_{TR} + 10$ ó $V_{TR} + 20$) será equivalente al 100%; observando, que en la curva de análisis con deflexión menor de 45° no considera ningún cambio al llegar a su PC. Y cuando esa deflexión es mayor de 45° , la velocidad disminuye en 10 kph es decir en velocidad relativa pasa del 100% al 83.3%. Cuando las entretangencias son mayores de 250 m, hay un comportamiento diferente según la tabla, pero este aspecto no es considerado ya que en terrenos montañosos se encuentran muy pocas entretangencias con estos valores.

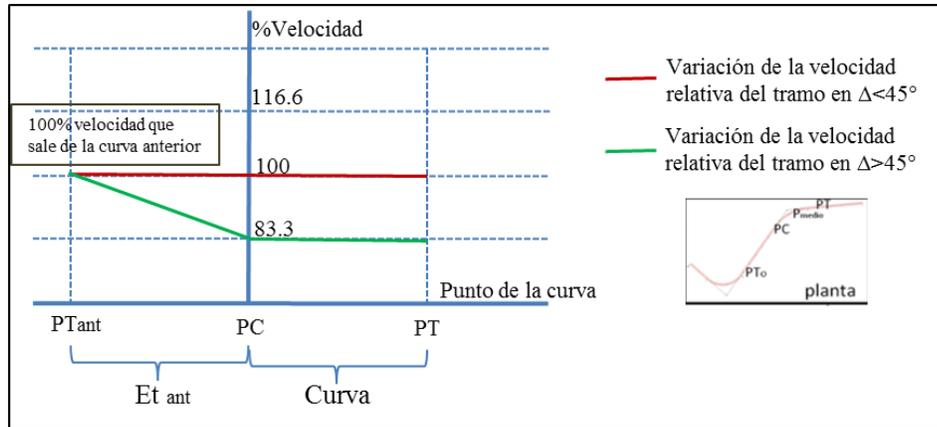


Figura 18. Variación de la velocidad específica (%velocidad Vs Punto de la curva), asimilada a velocidad relativa tomando como referencia la tabla 2.2 del Manual de Diseño Geométrico de Colombia 2008. Fuente: elaboración propia

5.1.3 Resumen de observación y análisis de los resultados para validación de la

Tabla 12

Las Figura 19 y Figura 20, presentan el patrón de comportamiento utilizando la velocidad relativa operacional promedio, resultante de las muestras para las curvas agrupadas según los casos (lado izquierdo caso 1A y caso 1B; lado derecho caso 2 y caso 3). De acuerdo a lo que se visualiza en las gráficas, en donde la línea roja y amarilla representan los cambios de velocidad según el manual y las líneas azul y verde son aquellas definidas por los datos tomados en campo: la azul cuando la deflexión es menor de 45° y la verde cuando la deflexión es mayor, se presentan los siguientes resultados, que posteriormente están detallados en la Figura 19.

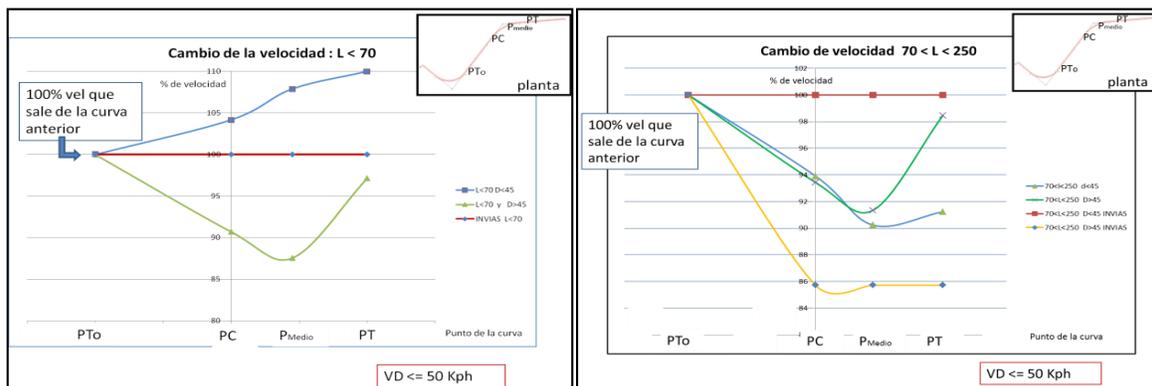


Figura 19. Relación de las variaciones de velocidad obtenidas en campo y según el manual; al iniciar el tramo recto (PTo=Pant), comienzo (PC), punto medio (Pmedio) y terminación de la curva (PT)- VIAS SECUNDARIAS Y Terciarias (VD<=50 kph) Fuente: elaboración propia

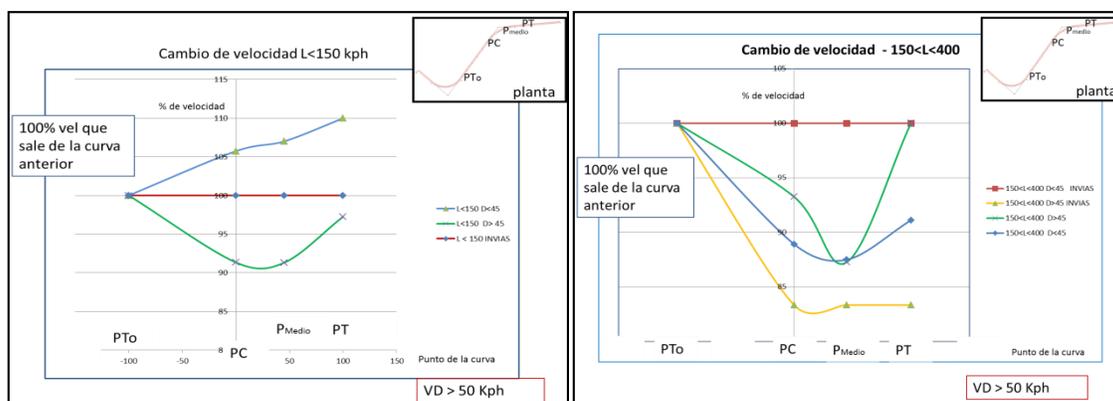


Figura 20. Relación las variaciones de velocidad obtenidas en campo y según el manual; al iniciar el tramo recto ($PT_o=P_{ant}$), comienzo (PC), punto medio (P_m) y terminación de la curva (PT)- VIAS PRIMARIAS ($V_D \geq 50$ kph)
 Fuente: Elaboración propia

- Los resultados conseguidos para velocidades menores de 50 kph y mayores a esta (observando las dos figuras (Figura 19 y Figura 20), tienen una tendencia similar tanto para las observaciones de campo como para los requerimientos del manual (INVIAS).
- Según la tabla 2.2 del Manual, en el caso 1, para las dos diferencias de velocidad, no hay distinción en el ángulo de deflexión, pero para demostrar que en campo se encontró una diferencia, se subdividió el caso 1 como: caso 1A (Deflexiones $\leq 45^\circ$) y caso 1B (Deflexiones $> 45^\circ$).
- En el caso 1A, cuando la longitud de la entretangencia es menor de 70 m y cuando la longitud de entretangencia es menor de 150 m y ángulos de deflexión menores de 45° , para ambos rangos de velocidad, el vehículo aumenta su velocidad al llegar a la curva y sigue aumentándola mientras la atraviesa y sale de ella.
- En el caso 1B, cuando la longitud de la entretangencia es menor de 70 metros y cuando la longitud de entretangencia es menor de 150m y ángulo de deflexión mayor de 45° , hay una disminución de la velocidad al llegar a la curva y disminuye aún más en la mitad de esta. Al pasar la mitad de la curva aumenta la velocidad con respecto al punto anterior.
- Para el caso 2 y 3, cuando la entretangencia está entre 70 y 250 m y entre 150 y 400 m tanto para deflexiones menores de 45° y mayores a 45° , el vehículo presenta el mismo comportamiento que en el caso 1B; al ingresar a la curva baja la velocidad considerablemente y la sigue bajando hasta llegar al punto medio de la curva y la aumenta para salir de esta.

- Los valores de los porcentajes de incremento o disminución de velocidad, comparando paralelamente los casos cuando la velocidad de diseño es menor de 50 kph y mayor a este valor son similares.
- El manual, en el caso 3, considera un cambio brusco en la velocidad al entrar en la curva, pero no especifica la variación de velocidad dentro de ella.

La Tabla 13 y Tabla 14 , resume los aspectos encontrados en el análisis de validación.

Se tiene como conclusión; que la

Tabla 12. Asignación de velocidad específica – que se encuentra en la Tabla 2.2 del Manual de diseño Geométrico de Colombia - 2008 del presente documento, se queda corta en las posibilidades de la asignación de la velocidad específica; ya que no tiene las siguientes consideraciones:

- Variación de la velocidad dentro de la curva.
- Afectación por la deflexión en tramos menores de 150 m.
- Incremento de velocidad en entretangencias cortas con deflexiones menores a 45°.

Recordando que el presente estudio se refiere a terrenos montañosos, no se han encontrado entretangencias mayores a 400m en el trabajo de campo, es por esta razón que la parte de la Tabla 12, que supone estas medidas, no se consideraron en el análisis de comparación.

Tabla 13. Resumen de la comparación de los cambios de la velocidad en cada punto de la curva, para velocidad de diseño MENOR de 50 kph.

VD <= 50 kph						
Longitud del tramo recto anterior	CASOS según	Deflexión de la curva	Punto en la curva	Incremento de velocidad OBTENIDO con respecto al pto anterior	Incremento de la velocidad según el MANUAL con respecto al pto anterior	
L <= 70	CASO 1/A	D <= 45°	PC	4%	0%	
			Pm	4%		
			PT	2%		
	CASO 1/B	D > 45°	PC	-9%		
			Pm	-4%		
			PT	10%		
70 < L < 250	CASO 2	D <= 45°	PC	-6%	0%	
			Pm	-4%		
			PT	3%		
	CASO 3	D > 45°	PC	-7%		-15%
			Pm	-3%		0%
			PT	3%		0%

Tabla 14. Resumen de la comparación de los cambios de la velocidad en cada punto de la curva, para velocidad de diseño MAYOR de 50 kph.

VD > 50 kph						
Longitud del tramo recto anterior	CASOS según Manual	Deflexión de la curva	Punto en la curva	Incremento de velocidad OBTENIDO con respecto al pto anterior	Incremento de la velocidad según el MANUAL con respecto al pto anterior	
L ≤ 150	CASO 1A	D ≤ 45°	PC	6%	0%	
			Pm	2%		
			PT	3%		
	CASO 1B	D > 45°	PC	-8%		
			Pm	0%		
			PT	6%		
150 < L < 400	CASO 2	D ≤ 45°	PC	-12%	0%	
			Pm	-2%		
			PT	5%		
	CASO 3	D > 45°	PC	-7%		-17%
			Pm	-6%		0%
			PT	13%		0%

Fuente: elaboración propia

5.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE UNA CARRETERA EN TERRENO MONTAÑOSO EN COLOMBIA

Trayendo a mención el concepto de la consistencia en el diseño geométrico de carreteras y relacionándolo con los datos obtenidos y procesados de velocidad en el trabajo de campo efectuado en la presente investigación junto con la geometría de la carretera considerada, pueden darse una aproximación de la relación del cambio de velocidad efectuado, al llegar a cada elemento curvo del recorrido con las características geométricas de cada curva. El resultado esperado entonces en este trabajo, es que a través del procesamiento de las velocidades obtenidas y relacionándolo con la geometría de la carretera, se definan los elementos de las curvas horizontales que influyen en mayor grado en las variaciones de velocidad en curvas sucesivas, en terrenos catalogados como montañosos.

Teniendo en cuenta la literatura realizada sobre las variables utilizadas por los autores donde tomaron: radio (R), deflexión (D), longitud de curva, (Lc), longitud del tramo recto anterior (Ent), grado de curvatura (1/R), gradiente de velocidad (Grad V), peralte (e%), pendiente longitudinal

(P%), velocidad inicial (V_i); se establecieron para el procesamiento de la información de este proyecto la correlación de las siguientes variables (véase Figura 21):

1. Radio de la curva de análisis (R).
2. Deflexión de la curva de análisis (D).
3. Longitud del tramo recto anterior ($Ent\ ant$).
4. Longitud de la curva de análisis (L_c).

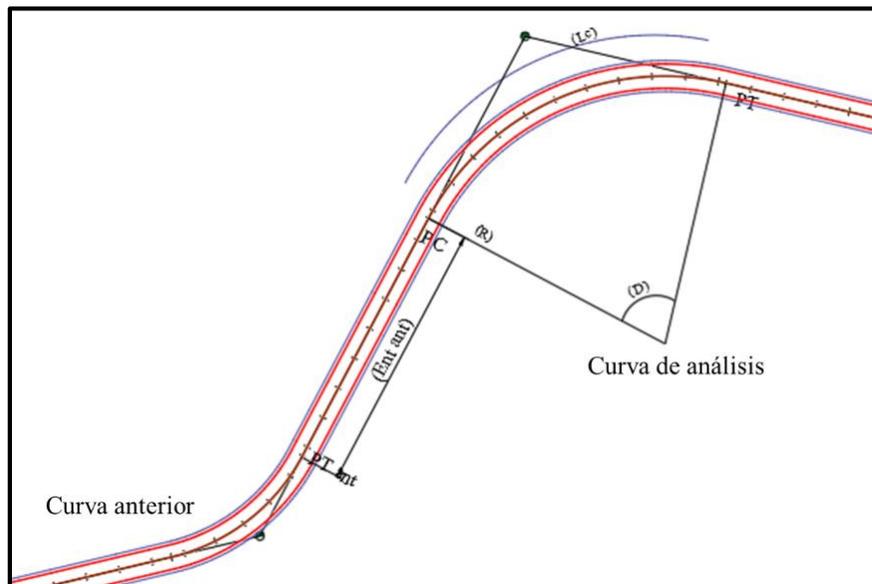


Figura 21. Variables que se consideraron para análisis de consistencia: (R), (D), (L_c), ($Ent\ ant$)

Fuente: elaboración propia

Tomando como punto de partida la base de datos conformada por 9750 puntos, resultado de la combinación de las velocidades tomadas a lo largo de cada curva por cada sujeto, los elementos geométricos considerados de la curva, la variación de la velocidad considerada con respecto al inicio del tramo recto anterior ($\Delta VR\%$) y la relación de la longitud del tramo recto anterior con respecto a la longitud de la curva de análisis ($DR\%$).

La Figura 22, describe a través de un ejemplo los datos procesados correspondientes a la curva 10 y únicamente del sujeto 1. Con el $VR\%$ igual a 100 se determina la velocidad relativa en el PT_{ant} (inicio del tramo recto anterior), con el $DR\%$ igual a 0, se identifica la velocidad relativa en el punto de comienzo del comienzo de la curva (PC), con el $DR\%$ entre 45 y 55, se determina

la velocidad relativa en la mitad de la curva (Pm) y con el DR% con valor de 100, se asimila la velocidad relativa al final de la curva (PT).

Con las velocidades relativas de todos los sujetos en una curva y en un punto específico, se calcula la mediana considerando que es el mecanismo estadístico más apropiado, que nos permite dejar fuera del análisis aquellos datos que se alejan de los resultados centrales de las velocidades obtenidas, teniendo en cuenta que es éste, un procedimiento particular de los conductores que presentan diferentes comportamientos al conducir y se alejan de la información dada por la distribución central de los datos, ver la Figura 23

Curva	Sujeto	Abscisa	DR %	VR %	Velocidad	Radio	Deflexión	Pend %	Lc	ETant
10	1	2251	-40	100	56	115	65	8	130	40
		2245	-36	101	57					
		2229	-23	101	57					
		2213	-12	99	56					
		2198	0	99	56					
		2182	12	102	57					
		2166	25	103	58					
		2150	37	101	57					
		2135	49	93	52					
		2121	59	86	48					
		2108	70	87	49					
		2093	81	95	54					
		2078	92	104	58					
2068	100	108	60							

Figura 22. Clasificación de los puntos PTant, PC, Pm y PT en una curva específica para un sujeto.

Fuente: elaboración propia

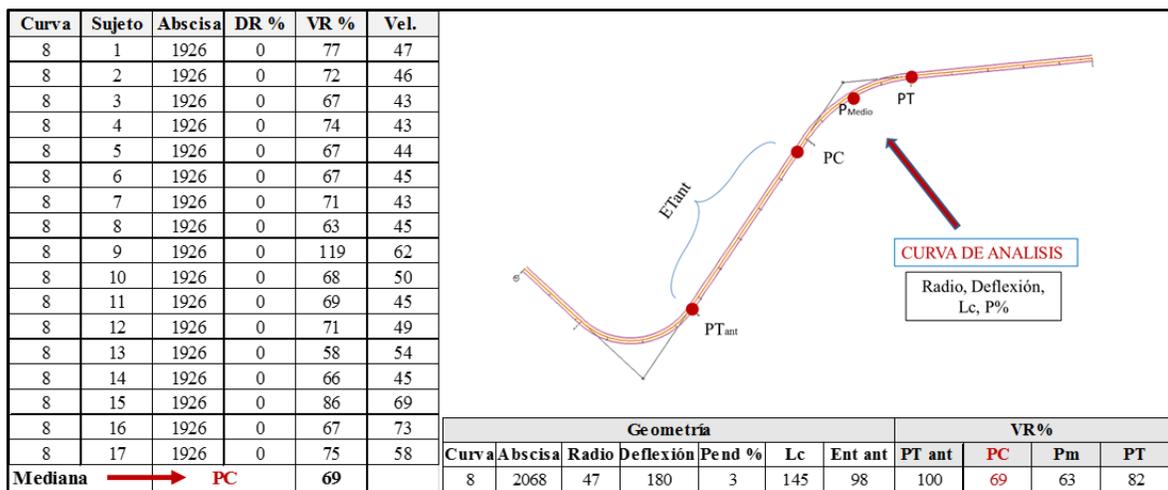


Figura 23. Cálculo de la mediana en un punto en el PC de la curva 8

Fuente: elaboración propia

Consecutivamente, se realizó el cálculo de las velocidades relativas para cada curva, resultando en total los 46 registros de sus correspondientes curvas.

Se continuó el proceso calculando la variación del porcentaje de la velocidad desde el inicio del tramo recto, hasta el inicio del punto de la curva; luego, hasta el punto medio de la curva y finalmente hasta el punto final de la curva. En la Tabla 15, se presentan los valores en los puntos de la curva descritos y el valor de fluctuación en porcentaje. Aparecen en orden descendiente, tomando como pauta la diferencia entre el punto medio de la curva y el inicio del tramo recto anterior (Pm-PTant).

Tabla 15. Valores de velocidad relativa en los puntos de las curvas y diferencia entre esos puntos.

Curva	VR%				D VR% entre puntos			Curva	VR%				D VR% entre puntos		
	PT ant	PC	Pm	PT	PC-PTant	Pm-PTant	PT-Pm		PT ant	PC	Pm	PT	PC-PTant	Pm-PTant	PT-Pm
8	100	69	63	82	-31	-37	-18	124	100	94	97	95	-6	-3	-5
13	100	70	64	82	-30	-36	-18	139	100	97	98	101	-3	-2	1
113	100	86	72	82	-14	-28	-18	111	100	95	98	98	-5	-2	-2
32	100	76	72	91	-24	-28	-9	30	100	96	99	104	-4	-1	4
121	100	81	74	79	-19	-26	-21	40	100	102	99	102	2	-1	2
25	100	73	75	80	-27	-25	-20	38	100	98	100	110	-2	0	10
127	100	83	78	82	-17	-22	-18	33	100	104	100	107	4	0	7
28	100	83	79	94	-17	-21	-6	24	100	100	101	107	0	1	7
132	100	89	80	78	-11	-20	-22	130	100	97	101	96	-3	1	-4
27	100	89	83	104	-11	-17	4	21	100	97	103	116	-3	3	16
134	100	90	84	82	-10	-16	-18	122	100	101	103	110	1	3	10
22	100	90	86	81	-10	-14	-19	23	100	100	103	108	0	3	8
119	100	90	90	87	-10	-10	-13	20	100	104	104	109	4	4	9
125	100	93	91	103	-7	-9	3	120	100	106	105	106	6	5	6
35	100	88	91	89	-12	-9	-11	123	100	108	105	103	8	5	3
138	100	89	91	88	-11	-9	-12	129	100	108	109	121	8	9	21
135	100	85	92	92	-15	-8	-8	112	100	109	110	111	9	10	11
128	100	96	92	110	-4	-8	10	140	100	110	110	110	10	10	10
36	100	93	94	94	-7	-6	-6	136	100	109	111	124	9	11	24
19	100	90	95	102	-10	-5	2	34	100	105	111	120	5	11	20
11	100	86	96	85	-14	-4	-15	133	100	117	112	122	17	12	22
10	100	96	97	105	-4	-3	5	126	100	117	114	116	17	14	16
39	100	90	97	90	-10	-3	-10	12	100	111	118	125	11	18	25

Fuente: elaboración propia

Se efectuaron exploraciones de las gráficas para conocer el comportamiento de la velocidad de los vehículos con respecto a cada variable de manera independiente; utilizando gráficas de regresión por medio del software Minitab¹⁰. Se graficó la relación entre la diferencia de velocidad relativa (Pm-PTant) y cada una de las variables: radio (R), deflexión (D), longitud de la curva (Lc),

¹⁰ Minitab, software libre utilizado como herramienta para la realización de análisis estadísticos y otras aplicaciones.

pendiente (p%) y entretangente anterior (Ent ant), teniendo en cuenta de que es en la mitad de la curva (Pm) en donde se aprecia, la máxima disminución de velocidad desde el inicio del tramo recto anterior (PTant).

Las Figura 24 y Figura 25 describen los gráficos de dispersión realizados entre cada variable y la diferencia de velocidad relativa descrita en el párrafo anterior; se realiza en forma paralela, las observaciones encontradas sobre las tendencias de los gráficos relacionando las variables involucradas y observadas de forma independiente.

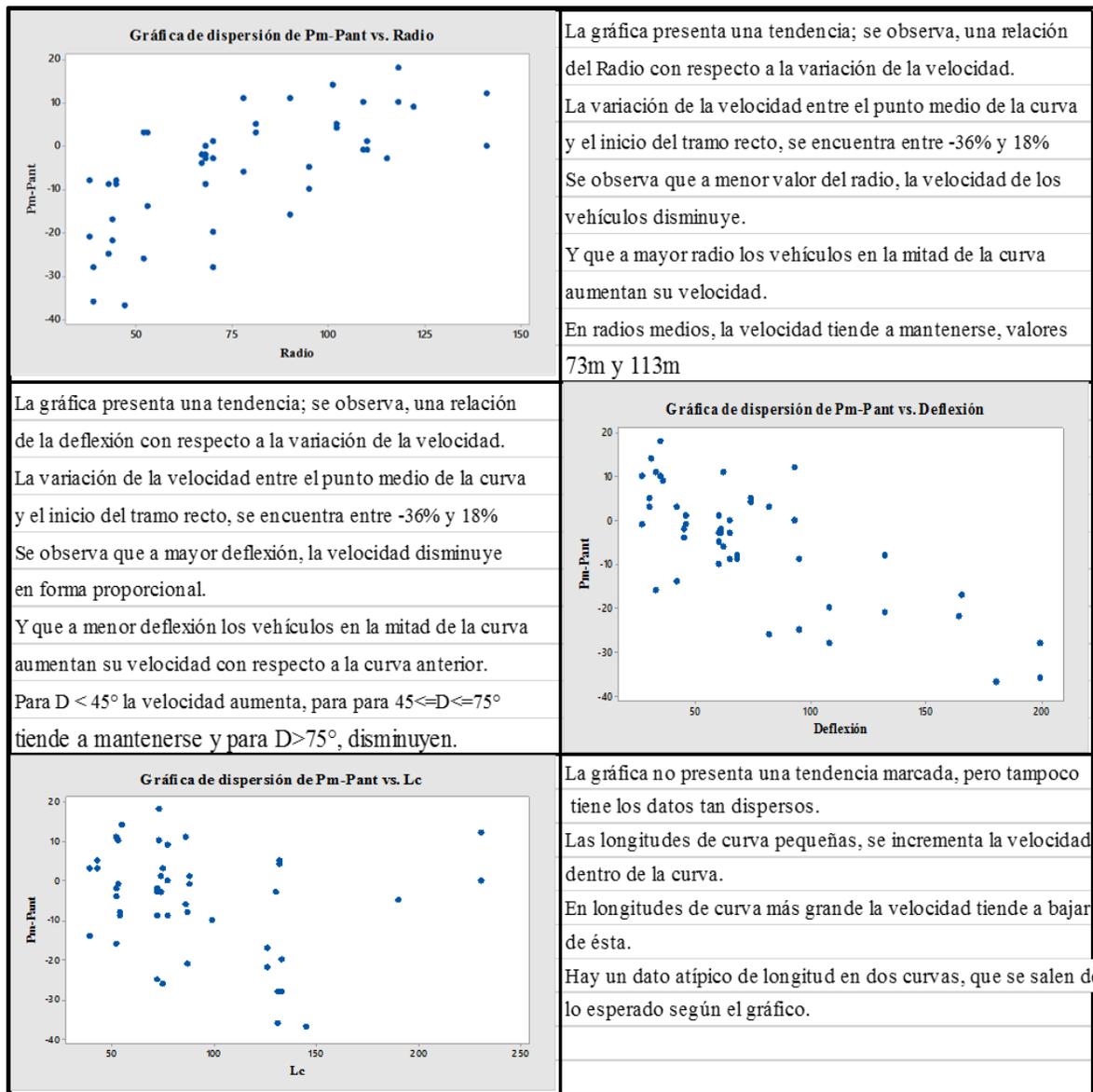


Figura 24. Gráfica de dispersión diferencia de velocidad relativa (Pm-PTant) con: (1) Radio, (2) deflexión y (3) con Longitud de la curva.

Fuente: elaboración propia

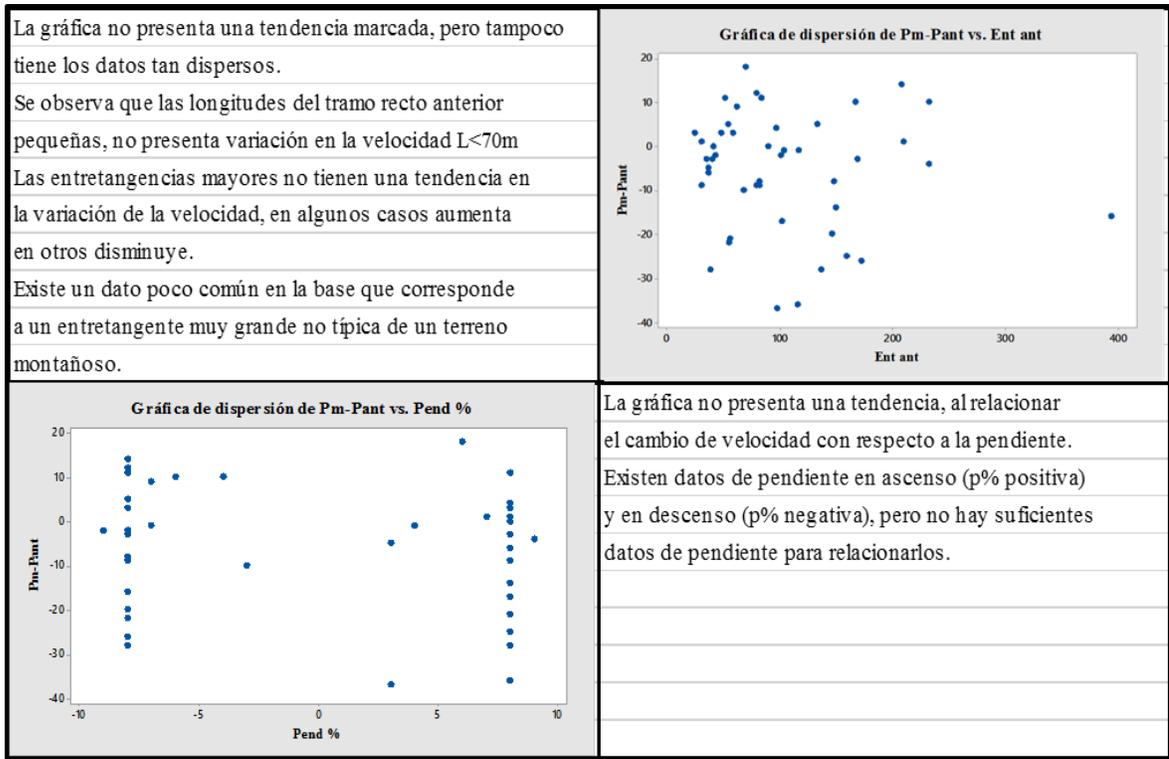


Figura 25. Gráfica de dispersión diferencia de velocidad relativa (Pm-PTant) con: (4) Entretangente anterior, (5) pendiente longitudinal.

Fuente: elaboración propia

Se encontraron similitudes al efectuar un análisis cualitativo, de los resultados al relacionar las variables con la diferencia de la velocidad relativa; estos, que permitieron asociar los perfiles de velocidad de acuerdo al comportamiento de los vehículos al salir de la curva anterior, ingresar a la curva en cuestión, pasar a través de la curva y al salir de ésta.

Se realizaron todos los perfiles de velocidad; luego, se agruparon según la tendencia del cambio de velocidad y finalmente se concentraron en tres (3) grupos. Los grupos que se especifican en las Figura 26, Figura 27 y Figura 28. En los tres casos, se graficó la velocidad relativa Vs los puntos antes mencionados sobre la curva horizontal; posteriormente, se trazó una línea de tendencia, que describe la forma en la que los vehículos se desplazan antes y durante la curva. En seguida, se observó en cada grupo que características análogas había entre sus variables. La

variable más evidente fue la deflexión, que permitió definir los rangos de acuerdo a la variación de la velocidad relativa.

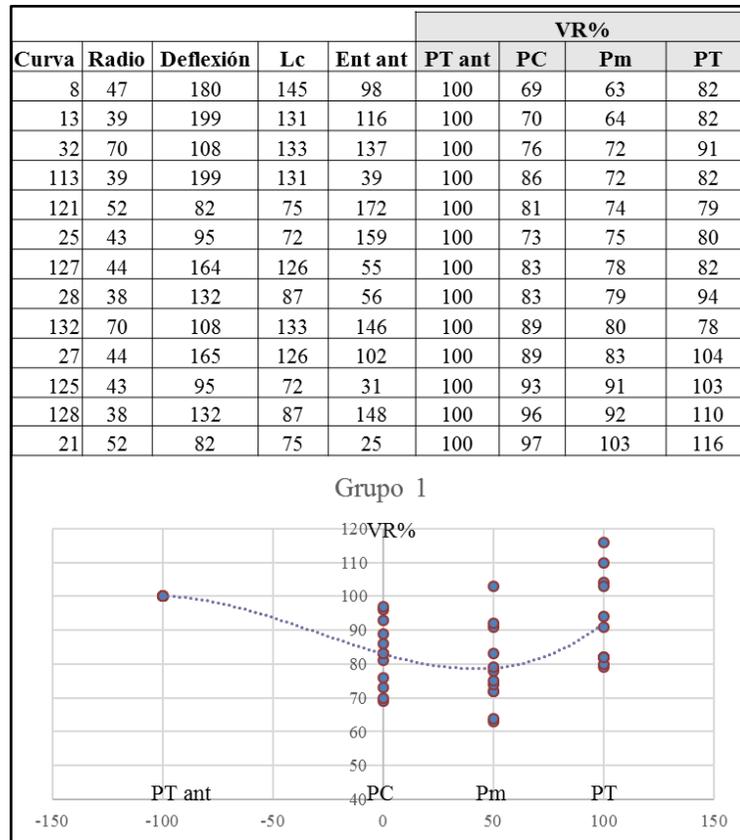


Figura 26. Línea de tendencia en el perfil de velocidad del Grupo 1
Fuente: elaboración propia

Los perfiles obtenidos y seleccionados en este grupo, indican, como la velocidad disminuye al llegar a la curva y dentro de esta siguen disminuyendo hasta aproximadamente la mitad; luego, los vehículos aumentan la velocidad, a un valor menor o casi igual a la velocidad con que inicia el tramo recto anterior.

En la geometría de las curvas a las que corresponde este grupo, se observa los siguientes resultados (Tabla 16):

Tabla 16. Valores de los elementos geométricos de las curvas horizontales del grupo 1

D (grados)	82 - 199
R (m)	41 - 70
Ent ant (m)	25- 172
Lc (m)	72 - 145

VR% (Pm - PTant)	63 - 103
-------------------------	----------

Fuente: elaboración propia

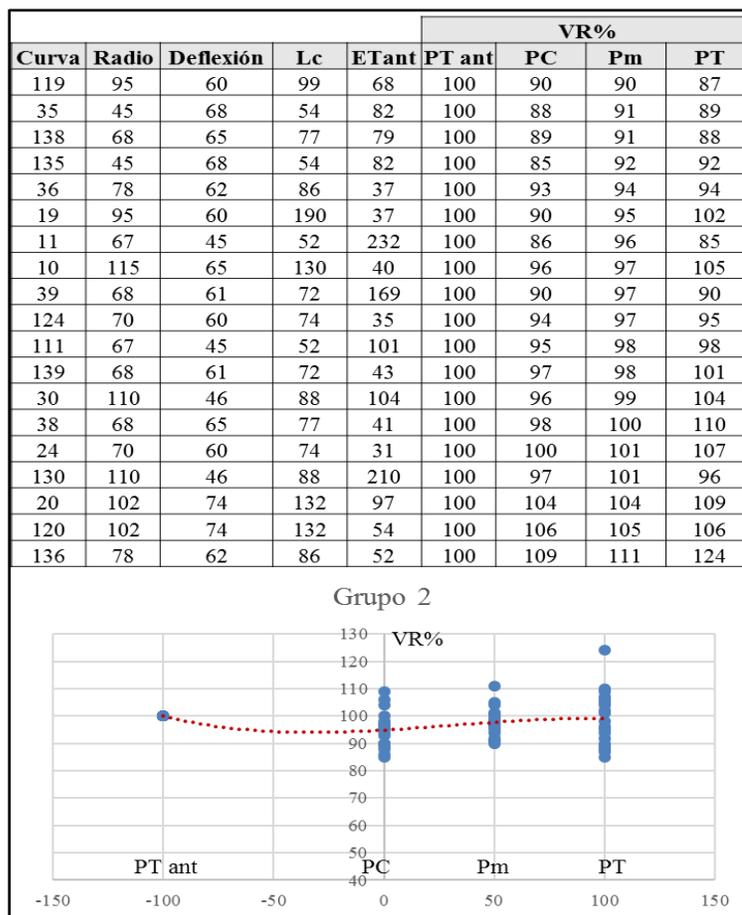


Figura 27. Línea de tendencia en el perfil de velocidad del Grupo 2

Fuente: elaboración propia

En este grupo, la tendencia de los perfiles enseña que la velocidad al llegar a la curva disminuye, en un porcentaje menor que en el caso del grupo 1, en la mitad de la curva la velocidad tiende a subir y al salir de la curva sale con un porcentaje igual a como inició al final de la curva anterior. Los valores encontrados de la geometría en este grupo (2) son las siguientes (Tabla 17):

Tabla 17. Valores de los elementos geométricos de las curvas horizontales del grupo 2

D (grados)	45 - 74
R (m)	45 - 115
Ent ant (m)	43 - 232
Lc (m)	52 - 132
VR% (Pm - PTant)	90 - 111

Fuente: elaboración propia

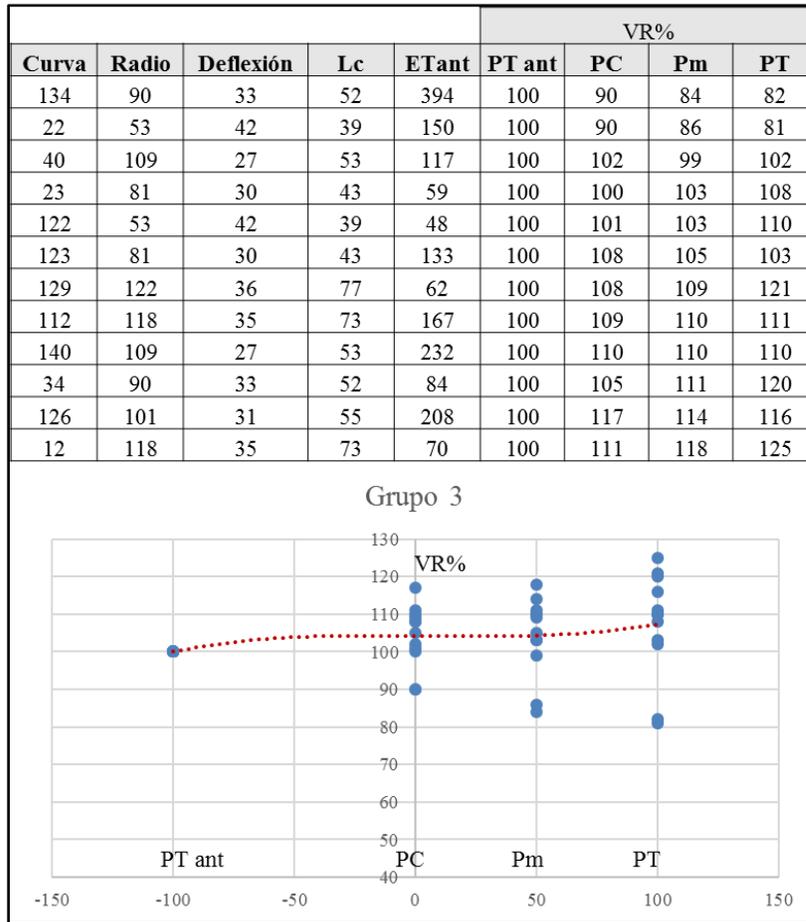


Figura 28. Línea de tendencia en el perfil de velocidad del Grupo 3

Fuente: elaboración propia

En este caso, las curvas que se agruparon; tienen un comportamiento diferente a los grupos 1 y 2. Al llegar a la curva, los vehículos aumentan la velocidad y la siguen aumentando en la mitad de la curva y más aún al salir de esta. Los datos de las variables correspondientes a la geometría de estas curvas están dentro de los siguientes valores (Tabla 18):

Tabla 18. Valores de los elementos geométricos de las curvas horizontales del grupo 3

D (grados)	30 - 42
R (m)	53 - 118
Ent ant (m)	48 - 394
Lc (m)	39 - 77
VR% (Pm - PTant)	84 - 118

Fuente: elaboración propia

Para simplificar, se ha realizado la recopilación en la Tabla 19, de los rangos de cada una de las variables de la geometría que se analizaron con respecto a los perfiles de velocidad, resultado del cambio de la velocidad relativa en los distintos puntos de cada curva.

Tabla 19. Resumen de los factores o variables que influyen en la consistencia del diseño.

GRUPO	VARIABLE				RESULTADO	
	D (grados)	R (m)	Ent ant (m)	Lc (m)	VR% (Pm - PTant)	
1	82 - 199	41 - 70	25- 172	72 - 145	63 - 103	78
2	45 - 74	45 - 115	43 - 232	52 - 132	90 - 111	97
3	30 - 42	53 - 118	48 - 394	39 - 77	84 - 118	107

Fuente: elaboración propia

Se concluye; que la deflexión, el radio, la entretangencia y la longitud de la curva, son los factores que afectan la consistencia en el diseño geométrico de un trazado de carretera; siendo en el próximo numeral, en donde se expone el peso que tiene cada variable especificándolo por medio de un modelo matemático.

5.3 MODELO ESTADÍSTICO PARA ENCONTRAR LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE UNA CURVA HORIZONTAL EN TERRENO MONTAÑOSO.

En consecuencia, al punto anterior; en donde, se ha determinado los factores que influyen en la consistencia del diseño geométrico y por tanto en la determinación de la velocidad específica en cada curva de observación, se ha realizado una correlación de esas variables, para así determinar el peso de cada una.

5.3.1 Combinación de factores que afectan la velocidad en una curva

A través del software Minitab, se ha realizado una regresión entre todos los factores planteados; encontrando el siguiente resultado expuesto en la Tabla 20, en donde especifica cual combinación en conjunto dan una mejor correlación para obtener como resultado lo que varía la velocidad en porcentaje con respecto a la geometría de la vía.

Tabla 20. Combinación de la regresión de las variables: radio, deflexión, longitud de curva y longitud de entretangente Vs Velocidad relativa en el punto medio (Pm – PTant)

Combinación	R-cuad.	R-cuad. (ajust)	R-cuad. (pred.)	Cp de Mallows	S	Pm - PT ant			
						Radio	Deflexión	Lc	Ent ant
1a	65.9	65.1	62.8	14.3	7.9632		X		
1b	48	46.8	43.2	42.3	9.8315	X			
2a	70.2	68.7	65.9	9.6	7.5375	X	X		
2b	68.6	67	62.9	12.2	7.7403	X		X	
3a	73.9	71.9	67.6	5.9	7.1462	X		X	X
3b	72.8	70.7	67.1	7.6	7.2978	X	X		X
4	75.7	73.2	69.2	5	6.9813	X	X	X	X

Fuente: elaboración propia

La combinación con mejor correlación corresponde a la #4, en donde relaciona todos los factores; pero al revisar los parámetros estadísticos, se determina que la mejor combinación es la #2a en donde se correlaciona el radio y la deflexión; porque su valor de correlación es relativamente alto, tiene solamente dos (2) variables; que responde al principio de parsimonia, la cual establece que la solución más simple es la más adecuada.

Además, el valor del Cp de Mallows bajo en la #2a, comparado con la combinación #2b; es una buena característica de que esta combinación tiene una recomendable capacidad predictiva. Siguiendo la recomendación del software y del análisis cualitativo realizado en el numeral 5.1 que determina las variables que afectan en la consistencia; se ha realizado en el software, la respectiva regresión.

5.3.2 Análisis de regresión: Pm vs. Radio, Deflexión

Respecto al numeral anterior, en donde se determinó el modelo de regresión más representativo para justificar el valor de la velocidad relativa como la variable respuesta en función de las variables independientes; y en respuesta a la recomendación de que la mejor combinación es aquella conformada por radio (R) y deflexión (D). Se ha realizado la regresión múltiple entre Pm como variable respuesta y Radio y Deflexión como independientes; los resultados se establecen en la Tabla 21. Análisis de Varianza Velocidad relativa PM Vs Radio y Deflexión

Tabla 21. Análisis de Varianza Velocidad relativa PM Vs Radio y Deflexión

<i>Análisis de varianza</i>					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	5352.6	2676.29	47.11	0.000
Radio	1	327.4	327.37	5.76	0.021
Deflexión	1	1690.5	1690.50	29.76	0.000
Error	40	2272.5	56.81		
Falta de ajuste	22	1125.5	51.16	0.80	0.691
Error puro	18	1147.0	63.72		
Total	42	7625.1			

<i>Resumen del modelo</i>			
S	R ²	R ² (ajustado)	R ² (pred)
7.53746	70.20%	68.71%	65.94%

<i>Coefficientes</i>					
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	97.57	6.36	15.34	0.000	
Radio	0.1399	0.0583	2.40	0.021	1.78
Deflexión	-0.1808	0.0332	-5.45	0.000	1.78

Fuente: elaboración propia

El objetivo del análisis de varianza es establecer si el modelo es o no es significativo. De acuerdo a los resultados obtenidos, se determina que según la Tabla 21; que el valor “p” para radio ($p=0.021$) y para deflexión ($p=0.000$) son menores que la significancia ($\alpha = 0.05$), lo que representa que las variables se incorporan al modelo son significativas, siendo adecuado para explicar la variable dependiente (Pm); es decir, es estadísticamente significativo. Por otro lado, el valor del R² ajustado de 68.71%, es el coeficiente que tomamos (ajustado) por el hecho de ser una correlación múltiple; quiere decir que el 68.71% de la variación de la velocidad se debe al ángulo de deflexión de las curvas y del valor del radio. El valor de T, expresa para deflexión (-5.45) y radio (2.40), que es la variable deflexión la que más influye en la variación de la velocidad relativa. El hecho de ser negativa es porque a menos grados de deflexión hay más justificación en la variación de esa velocidad.

Los coeficientes: para la constante 97.57, se refiere a la intercepción de la línea de regresión con el eje de la variable respuesta; el coeficiente correspondiente al radio de 0.1399, explica que, por cada 1m de radio, la velocidad relativa (Pm) aumentará en 0.1399%. Y que en el caso del

coeficiente de la deflexión de -0.1808%; enuncia que, por cada grado del ángulo de deflexión, la velocidad relativa disminuirá en 0.1808%.

Con base en los coeficientes descritos; se presenta el modelo de regresión resultado del análisis elaborado, mediante la Ecuación 1.

Ecuación 1. Modelo de regresión para cálculo de la velocidad relativa

$$\text{VR\%} = 97.57 + 0.1399 \text{ Radio} - 0.1808 \text{ Deflexión}$$

Fuente: elaboración propia

En los gráficos de regresión de la Figura 29, se observa como los datos siguen el modelo de regresión: es decir que tienen una tendencia normal; se observa, dos puntos alejados de la línea de probabilidad y corresponden a aquellos datos denominados como poco comunes como son los correspondientes a la curva 8 y a la curva 12. En la figura también se detalla que los datos están dentro de una distribución normal según el histograma. En la gráfica de ajustes y orden de observaciones se considera que no siguen tendencias o patrones y eso señala que los supuestos se estén cumpliendo de manera gráfica.

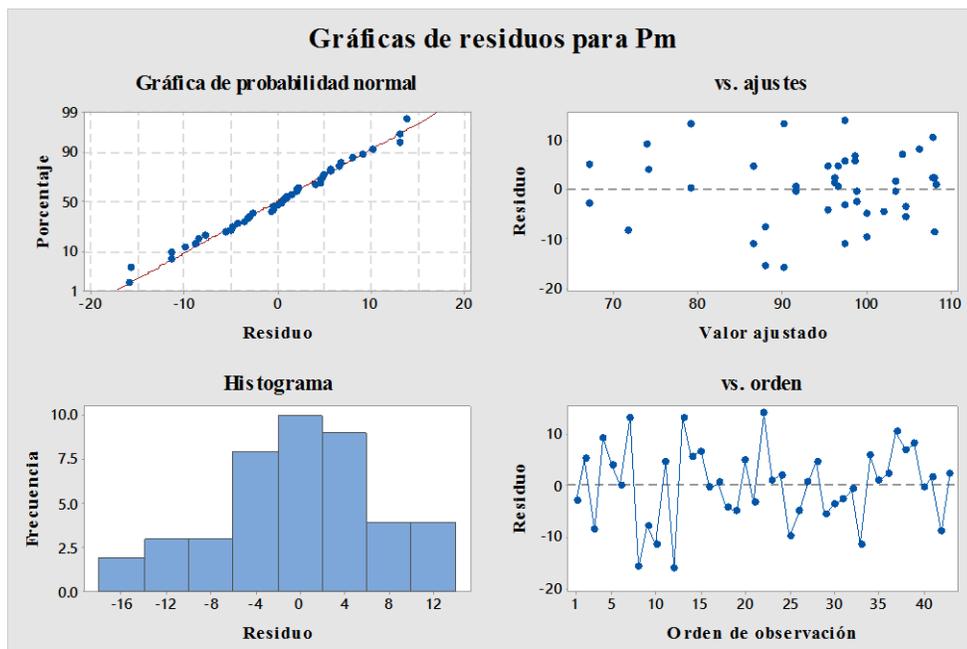


Figura 29. Gráficas de regresión de la deflexión y Radio Vs % de velocidad relativa

Fuente: Resultado de regresión en Minitab.

5.4 PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD ESPECÍFICA DE UNA CURVA HORIZONTAL EN TERRENO MONTAÑOSO.

De acuerdo al análisis cualitativo y al modelo encontrado en los numerales anteriores, se establece una coherencia en los resultados en donde se está determinando que los factores que influyen en la variación de la velocidad entre curvas horizontales sucesivas en un terreno montañoso son: la deflexión y el radio de la curva de análisis. Así las cosas, se presenta a continuación un mecanismo como sugerencia para encontrar la velocidad específica.

Este método propuesto, responde a la combinación del resumen de los resultados encontrados en la *Tabla 19. Resumen de los factores o variables que influyen en la consistencia del diseño.*, con el modelo que definió el cálculo de la variación velocidad relativa en el punto medio de la curva, Ecuación 1.

En ese sentido y después de realizar ajustes y sondeos de prueba, se llega a la siguiente propuesta: *Tabla 22*, para determinar la velocidad específica de una curva, con respecto a la velocidad con la que sale el vehículo del elemento curvo anterior.

Tabla 22. Determinación de la velocidad específica relativa (VR%) en la curva de análisis con respecto a la velocidad específica de la curva anterior, en terreno montañoso.

Deflexión (Grados)	Radio (m)					
	41 - 49	50 - 59	59 - 89	90 - 99	100 - 129	130 - 150
$\geq 150^\circ$	70	80	80	80	80	80
$135^\circ - 150^\circ$	80	80	80	90	90	90
$75^\circ - 135^\circ$	80	90	90	90	90	90
$45^\circ - 75^\circ$	90	90	100	100	100	110
$\leq 45^\circ$	100	100	100	100	110	110

Fuente: elaboración propia.

Para hacer uso de la tabla, debe conservarse el concepto del manual de consistencia en el diseño, en donde la velocidad específica no debe ser menor de la velocidad de diseño (V_D) o

velocidad de tramo (V_{TR})¹¹; además, no debe ser mayor de la velocidad del tramo en 20 kph. Por otro lado, la diferencia entre las velocidades específicas entre curvas sucesivas, no deben ser mayor a 10 kph. Siendo así, la asignación de velocidad específica propuesta en la Tabla 22; debe estar condicionada a los siguientes parámetros:

- $V_{TR} \leq V_{CH} \leq V_{TR} + 20$
- V_{CH} curva anterior – V_{CH} curva de análisis ≤ 10 kph
- Si $V_{CH} < V_{TR} \implies V_{CH} = V_{TR}$
- Si $V_{CH} > V_{TR} + 20 \implies V_{CH} = V_{TR} + 20$

Para determinar la velocidad específica relativa a la velocidad anterior de una curva identificada por la deflexión y radio utilizando la Tabla 22; se ingresa con el valor de la deflexión, ubicándola en uno de los rangos; posteriormente con el valor del radio, se localiza dentro del rango correspondiente y finalmente se encuentra la velocidad relativa al punto anterior.

Como ejemplo: para una Deflexión ($D = 100^\circ$) y Radio ($R = 80m$), la velocidad relativa será de 90% con respecto a la curva anterior. Por lo tanto, Si la velocidad específica del tramo recto anterior es de 60 kph; la velocidad en la curva en cuestión es de: $60 \text{ kph} * 90\% = 54 \text{ kph}$. Para complementar el ejercicio; si la velocidad del tramo es de 50 kph, la velocidad específica calculada es de 54 kph. Pero si la velocidad del tramo es de 60 kph, la velocidad específica para esa curva será de 60 kph (igual a la V_{TR}), lo que significa, que el diseñador debe aumentar el radio para lograr esa velocidad específica dentro del margen de consistencia. Ese radio será el necesario para que la velocidad en la curva con respecto a la anterior se conserve en un 100%; para una deflexión de 100° según el ejemplo, el radio deberá ser superior a 150m.

Con los datos obtenidos en el proceso de información, los cuales alimentaron el análisis cualitativo y estadístico, se realizó una comprobación de la clasificación propuesta obteniendo los siguientes resultados; en los cuales se identifica algunos puntos que quedan fuera de la regla.

¹¹ Parámetros de la velocidad específica, página 39 (INVIAS, 2008).

Tabla 23. Comparación de la velocidad relativa en el punto medio Pm observado, utilizando el modelo y mediante el cuadro propuesto.

			VR% Pm						VR% Pm		
Curva	Deflex.	Radio	Obser	modelo	cuadro	Curva	Deflex.	Radio	Obser	modelo	cuadro
28	132	41	79	79	80	36	62	78	94	97	100
128	132	41	92	79	80	136	62	78	111	97	100
13	199	41	64	67	70	119	60	95	90	100	100
113	199	41	72	67	70	19	60	95	95	100	100
25	95	43	75	86	80	20	74	102	104	98	100
125	95	43	91	86	80	120	74	102	105	98	100
127	164	44	78	74	70	30	46	110	99	105	100
27	165	44	83	74	70	130	46	110	101	105	100
8	180	47	63	72	70	10	65	115	97	102	100
121	82	52	74	90	90	22	42	53	86	97	100
21	82	52	103	90	90	122	42	53	103	97	100
32	108	70	72	88	90	23	30	81	103	103	100
132	108	70	80	88	90	123	30	81	105	103	100
35	68	45	91	92	90	134	33	90	84	104	100
135	68	45	92	92	90	34	33	90	111	104	100
11	45	67	96	99	100	126	31	101	114	106	110
111	45	67	98	99	100	40	27	109	99	108	110
138	65	68	91	95	100	140	27	109	110	108	110
39	61	68	97	96	100	112	35	118	110	108	110
139	61	68	98	96	100	12	35	118	118	108	110
38	65	68	100	95	100	129	36	122	109	108	110
124	60	70	97	97	100	33	93	141	100	100	90
24	60	70	101	97	100	133	93	141	112	100	90

Fuente: elaboración propia.

Las diferencias obtenidas entre la velocidad relativa observada, la calculada con el modelo y la establecida con el cuadro planteado, obedecen a un 20% de toda la información.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo principal del trabajo de investigación consistió en validar el procedimiento que indica el Manual de Diseño Geométrico de 2008 de Colombia, emitido por el Instituto Nacional de Vías INVIAS, para determinar la velocidad específica en curvas horizontales en terrenos montañosos, con el objeto de conservar el concepto de consistencia en el diseño geométrico.

En primera instancia; se puntualizan a continuación, algunas consideraciones generales que tiene el manual para calcular la velocidad específica de una curva Tabla 12. Asignación de velocidad específica – *que se encuentra en la Tabla 2.2 del Manual de diseño Geométrico de Colombia - 2008*:

- Considera para el análisis de velocidades en curvas sucesivas, el caso más crítico; es decir, terrenos planos en donde se desarrolla mayor velocidad mientras la entretangente es más larga; o sea, que el cambio de velocidad es mayor al entrar a la curva. Además, está dirigido a vehículos livianos, que son quienes desarrollan mayor velocidad.
- Maneja el concepto de la consistencia en el diseño además de conservar la velocidad en el recorrido y si se excede que ese valor no supere los 10 o 20 kph, presume que la variación entre la geometría dada por el radio y la deflexión de curvas sucesivas sean similares.
- De manera intrínseca, el manual aplica el concepto de visibilidad en la curva, a través de la deflexión. Si una curva tiene menor deflexión, se asume que su visibilidad es mayor.
- Tiene en cuenta por efectos de consistencia, la velocidad específica de la curva inmediatamente anterior; precisa por lo tanto el estudio de curvas sucesivas.
- Clasifica las longitudes de entretangencia del tramo recto anterior.
- En algunos casos, clasifica la deflexión de la curva de análisis en ángulos mayores o menores de 45°.
- Los cambios de velocidad entre curvas sucesivas que expone el manual están entre 0,10 y 20 kph. Y la velocidad específica no debe superar en 20 kph, la velocidad del tramo.
- En resumen, las variables que tiene en cuenta el manual para determinar los valores de esas velocidades son: velocidad del tramo recto anterior, longitud del tramo recto anterior y en algunos casos la deflexión.

Como resultado a la validación del método; se exponen las siguientes observaciones para terreno montañoso, no consideradas en el manual:

- ✘ No hay evidencia de asignación de las velocidades específicas para las carreteras según el tipo de terreno; plano, ondulado, montañoso y escarpado; el manual tiene en cuenta el terreno plano por ser la condición más crítica.
- ✘ Estima los casos en donde relaciona la longitud del tramo recto anterior y en algunos sucesos la deflexión; pues bien, se comprueba que la deflexión es esencial en todas las condiciones para determinar la velocidad.
- ✘ No se observa que hay cambio en la velocidad de los vehículos al atravesar la curva; es decir, la velocidad que se calcula se estima es para toda la curva.
- ✘ Para entretangentes (longitud del tramo recto anterior) pequeñas $L < 70\text{m}$ ($V_{TR} \leq 50\text{kph}$) y/o $L < 150\text{m}$ ($V_{TR} > 50\text{kph}$), en donde no se diferencia la deflexión, el manual asume que la velocidad se conserva; pero realmente, el comportamiento es distinto para deflexiones menores a 45° y mayores a este valor. En el primer caso, los usuarios aumentan la velocidad, al entrar a la curva, la incrementan al pasar por ella y mucho más al salir de ella. En el segundo caso ($D > 45^\circ$) los usuarios bajan la velocidad al entrar a la curva y requieren bajarla aún más en el medio de esta y aumentan con respecto al punto anterior, al salir.
- ✘ En el caso de entretangentes con longitudes medias $70\text{m} \leq L \leq 150\text{m}$ ($V_{TR} \leq 50\text{kph}$) y/o $150\text{m} \leq L < 400\text{m}$ ($V_{TR} > 50\text{kph}$), el manual sí establece una diferencia en el cálculo de velocidad específica en función de la deflexión (mayor o menor de 45°); pero en los resultados obtenidos, no se observa diferencia en la variación en función de la deflexión. Al ingresar a la curva de acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que los vehículos bajan la velocidad considerablemente y sigue bajando hasta aproximadamente el punto medio y finalmente aumenta la velocidad al salir de esta; en cambio en el manual, cuando la deflexión es menor de 45° la velocidad se conserva al llegar a la curva y cuando es mayor de 45° la velocidad disminuye en aproximadamente un 15% con respecto a cómo inicia el tramo recto anterior.
- ✘ El manual considera dos rangos para la deflexión; menor de 45° y mayor de 45° ; en las observaciones obtenidas se analiza que hay variaciones contundentes cuando el ángulo de deflexión es mayor de 90° , 135° e incluso cercano a 180° . Resaltando que la investigación se

ha realizado para terreno montañoso, se reitera que las deflexiones más comunes están entre 80° y 120° según Tabla 6; por lo tanto falta extender los casos del manual para estas situaciones.

- ✘ Realizando una comparación entre los resultados obtenidos, se puede decir que la realidad en la operación de los vehículos durante el trazado es mucho más sensible de lo que presenta el manual; este sugiere un comportamiento más rígido en cuanto a la velocidad y las variaciones en los tramos rectos y curvos, por tanto mas costoso.
- ✘ El radio no es considerado en la consistencia del trazado; siendo una variable que ha sido comprobada estadísticamente resultando significativa en la variación de la velocidad.

Según el procesamiento de la información; en donde se detectaron las variables de más influencia en la asignación de la velocidad específica de una curva horizontal, y en donde se determinó un modelo para su cálculo, se despliegan las siguientes conclusiones:

- La deflexión en la curva de análisis, es el parámetro que más afecta la velocidad de los vehículos en las curvas horizontales en terrenos montañosos; el radio tiene una consideración importante y definitivamente la velocidad con que inicia el tramo recto anterior es la que marca la pauta.
- Las deflexiones que especifica el manual son de: $D < 45^\circ$ y $D > 45^\circ$, identificándose en el resultado que la velocidad varía considerablemente en rangos de deflexión mayores a 45°; como los siguientes intervalos: 45°-75°, 75°-135°, 135°-150° y deflexiones mayores a 150°.
- La longitud de la entretangente, es decir, del tramo recto anterior a la curva es importante, pero analíticamente no reflejó una tendencia; por tal razón, no se tuvo en cuenta en el modelo sugerido para encontrar esa velocidad en la curva.
- La diferencia de velocidad en el tramo de la curva anterior y la de análisis, no es de justo de 10 kph como especifica el manual; esta diferencia depende de la velocidad anterior y es proporcional a la velocidad con que sale en el tramo recto anterior.
- Por medio de esta investigación, se sugiere un método para calcular la velocidad específica en función de la velocidad del tramo recto anterior, para terreno montañoso con radios menores de 150m.
- El mecanismo planteado hace uso del cuadro propuesto el cual está limitado al cálculo de velocidad específica de vehículos livianos, haciendo caso al manual que utiliza el caso más

crítico, ya que en el diseño en planta son estos vehículos quienes alcanzan la mayor velocidad y por tanto tendrá mayor impacto al llegar al elemento curvo.

- El método planteado como uno de los resultados de la investigación, tiene como aplicación adicional el chequeo de la consistencia de diseño de un tramo de carretera, en donde se puede a través de la geometría, revisar si el cambio de velocidad entre las curvas, están dentro de los parámetros de consistencia; en caso de que no se cumpliera, se sugiere modificar el radio inicialmente y el alineamiento en caso extremo.

En cuanto a la metodología utilizada con el receptor GPS, para determinar las velocidades de operación en un tramo de carretera, se refieren los siguientes puntos:

- Utilizar un receptor de navegación global cartográfico dinámico ha sido acertado; esto debido, a la cantidad de puntos que se pueden capturar en forma continua. Su procesamiento es engorroso, pero podría sistematizarse dando agilidad a los resultados.
- El tipo de puntos continuos que se captura, permite realizar un perfil de velocidad de forma eficiente y efectiva.
- Puede optimizarse el experimento, entregando un receptor a usuarios de la vía desde un punto denominado de inicio y que este lo entregue en un punto final del trayecto; de esta manera se puede realizar la prueba con conductores usuales de la vía.
- El equipo receptor utilizado fue cartográfico, un GPS navegador, no permite realizar el trabajo por la baja precisión de sus resultados.
- Este método, puede realizarse para efectos de inspección de seguridad vial; en donde se puede detectar las velocidades de operación en las curvas para tomar decisiones de rectificación de las mismas para garantizar la seguridad de los conductores. Por otro lado, para colocar señalización de una vía existente, acorde a los requerimientos que exige la vía para que los conductores se anticipen a su recorrido y circulen tranquilamente.

Adicional al desarrollo de los objetivos planteados en la propuesta del trabajo de investigación, se realizaron los siguientes productos, relacionados con los hallazgos obtenidos en el transcurso de la elaboración de la tesis:

- ✓ Presentación en el VIII Congreso Internacional y XI Congreso Nacional de Topografía, Agrimensura, Geomática y Geodesia, desarrollado en Bucaramanga, en octubre de 2017; de la

ponencia: “*Determinación de indicadores geométricos de una vía a partir de información obtenida con GPS y el programa TOPO 3*”.

- ✓ Presentación en el XIII Seminario Internacional de Investigación Urbana y Regional, desarrollado en Barranquilla, en septiembre de 2018; de la ponencia: “*Determinación de la velocidad específica de curvas horizontales en carreteras rurales sobre terreno montañoso*”
- ✓ Presentación en el XIII Congreso Colombiano de Transporte y Tránsito, desarrollado en Cartagena, en junio de 2019; de la ponencia: “*Relación entre las velocidades de diseño, operación y de señalización en vías rurales de dos carriles*” y de autoría de “Olmis Ramos, Fabián Navarrete y Alexandra Rosas”.
- ✓ Presentación en el I Congreso Internacional de Ingeniería Vial, desarrollado en Popayán, en octubre de 2019; del póster: “*Validación del método del manual de la velocidad específica de curvas horizontales en carreteras rurales sobre terreno montañoso*”

Como recomendaciones para proyectos posteriores se tienen las siguientes:

- Continuar con la investigación, de la determinación de la velocidad específica en terreno montañoso, ampliando las posibles combinaciones geométricas que se puedan encontrar y no se consideraron en el presente trabajo.
- Realizar la validación del método expuesto para encontrar la velocidad específica de una curva con respecto a la anterior en tramos de característica montañoso.
- Concatenar los resultados obtenidos en las investigaciones paralelas a ésta, en donde se determinó la velocidad específica de curvas circulares en terrenos plano y ondulados.
- Seguir indagando en el tema de la asignación de la velocidad específica, agregando otros parámetros que son característicos de las regiones colombianas, como es la pendiente longitudinal y el diseño vertical.
- Un trabajo que requiere una alta inversión y que por las limitaciones económicas y de recursos el actual resultado no es decisivo, pero si crea inquietud en los investigadores de carreteras colombianos.

BIBLIOGRAFÍA

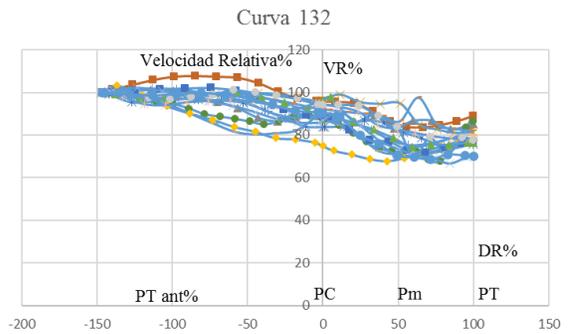
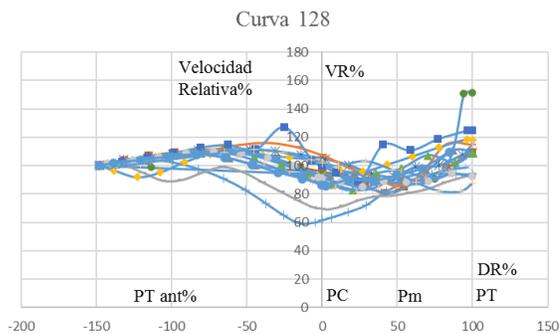
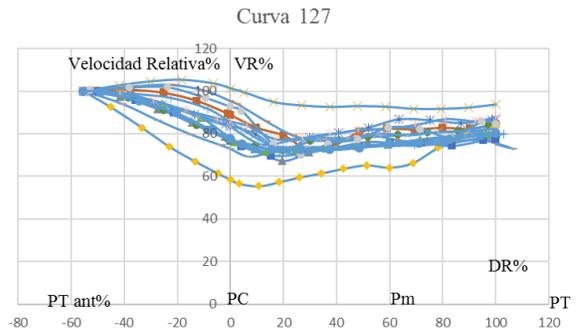
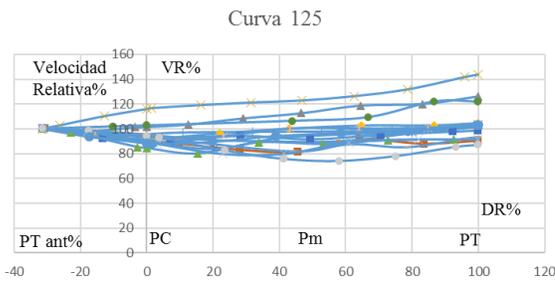
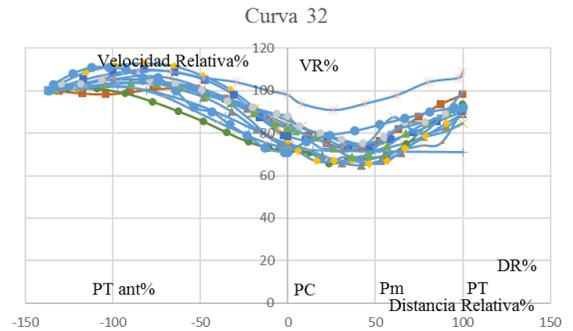
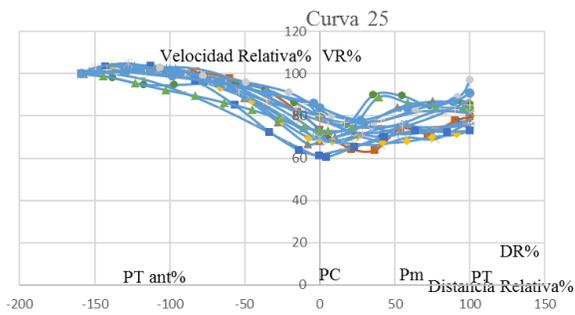
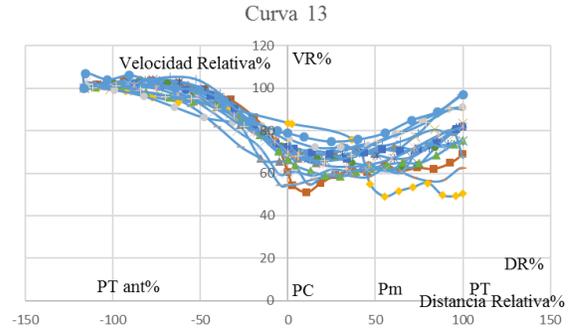
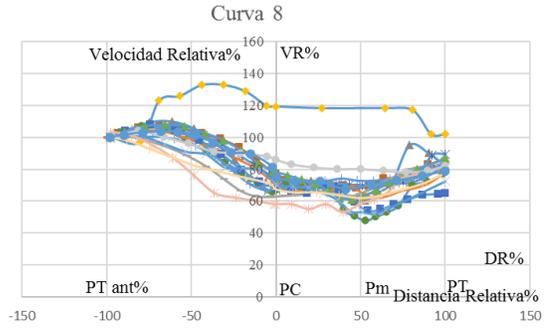
- AASHTO. (2011a). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington.
- AASHTO. (2011b). *Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices*.
- Almeida, R., Vasconcelos, L., & Bastos Silva, A. (2018). Design Consistency Index for Two-lane Roads based on Continuous Speed Profiles. *Traffic and Transportation*, 30(No. 2, 231-239), 9.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (6th ed.; AASHTO, ed.). Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2004JC002361>
- Anderson, I. B., Bauer, K. M., Harwood, D. W., & Fitzpatrick, K. (1999). Relationship to Safety of Geometric Design Consistency Measures for Rural Two-Lane Highways. *Transportation Research Record*, (1658), 43–51. <https://doi.org/10.3141/1658-06>
- ANSV. (2018). Agencia Nacional de Seguridad Vial.
- Awatta, M., Hassan, Y., & Sayed, T. (2006). Quantitative evaluation of highway safety performance based on design consistency. *Advance Transportation Studies*, 9.
- Bartlett, R. (2016). Road Design Standards 6.1. *ResearchGate*, 128. Retrieved from <https://roaddesignstandards.wordpress.com/>
- Cafiso, S., Di Graziano, A., Di Silvestro, G., La Cava, G., & Persaud, B. (2010). Development of comprehensive accident models for two-lane rural highways using exposure, geometry, consistency and context variables. *Accident Analysis and Prevention*, 42(4), 1072–1079. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.12.015>
- Calero Valenzuela, C. A. (2015). *Metodología para la Evaluación de la Consistencia de Diseño de Carreteras Rurales de Dos Carriles*.
- Cardenas, J. (2013). *Diseño Geométrico de Carreteras* (2nd ed.; E. Ediciones, Ed.). Bogotá, Colombia.
- Castro, M., Sánchez, J. F., Sánchez, J. A., & Iglesias, L. (2011). *Operating Speed and Speed Differential for Highway Design Consistency*. (November), 837–840. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000309).
- Figuroa Medina, A. M. (n.d.). *Effects of Road Design on Driver Behavior and Highway Safety*.
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., Wooldridge, M., & Miaou, S. (2003). *Design Speed*,

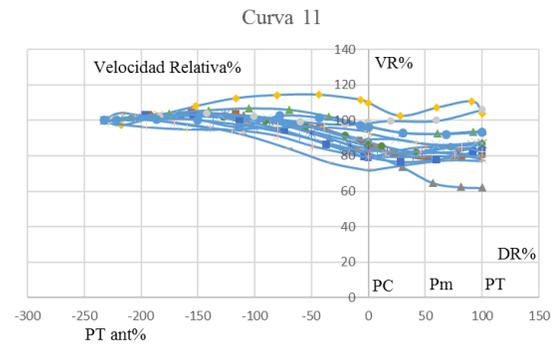
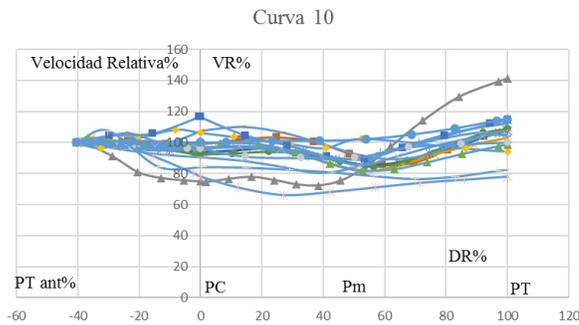
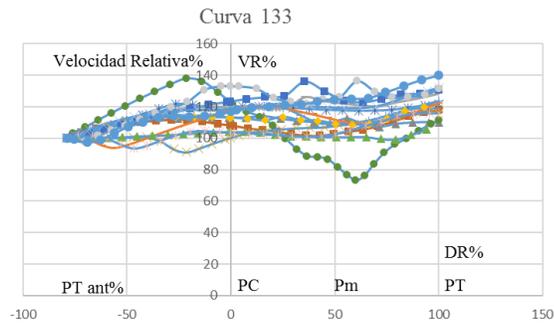
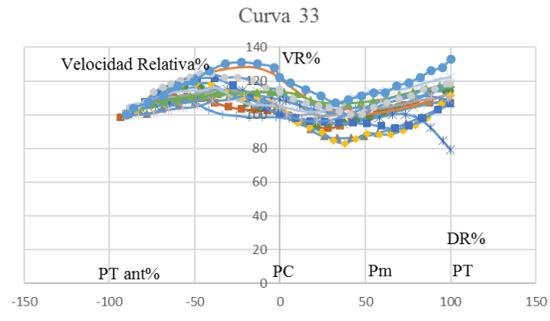
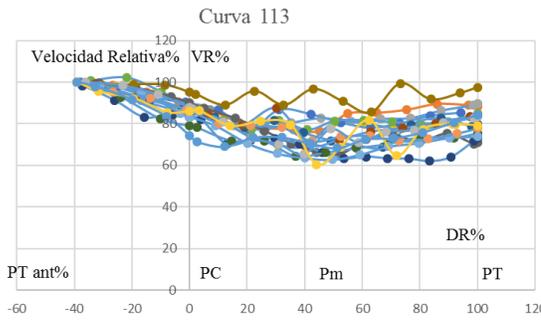
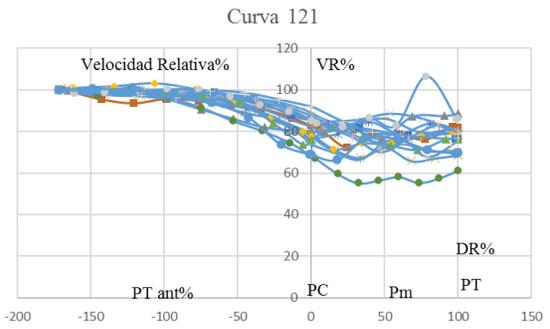
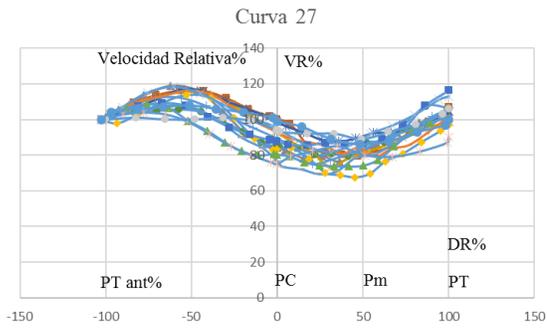
- Operating Speed, and Posted Speed Practices* (NCHRP 504). WASHINGTON, D.C.: Transportation Research Board.
- Gibreel, G., Easa, S., Hassan, Y., & El-dimeery, A. (1999). STATE OF THE ART OF HIGHWAY GEOMETRIC DESIGN CONSISTENCY. *Journal of Transportation Engineering*, 125(August), 305–313.
- Hauer, E. (2015). The Art of Regression Modeling in Road Safety. In *The Art of Regression Modeling in Road Safety*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12529-9>
- INVIAS. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá, Colombia.
- Krammes, R. a. y Irizarry, N. (1998). *Linear regrssion models for estimating operating speedes of passanger vehicles on rural two-lane highways*. Santander, España.
- Llopis-Castelló, D., Bella, F., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2018). New consistency model based on inertial operating speed profiles for road safety evaluation. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 144(4). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000126>
- Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2018). Development of a global inertial consistency model to assess road safety on Spanish two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 119(July), 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.07.018>
- MinTransporte. (2013). *PLAN NACIONAL DE SEGURIDAD VIAL*. Bogotá, Colombia.
- Montella, A., Colantuoni, L., & Lamberti, R. (2008). Crash prediction models for rural motorways. *Transportation Research Record*, (2083), 180–189. <https://doi.org/10.3141/2083-21>
- Montella, A., Galante, F., Mauriello, F., & Aria, M. (2015). Continuous speed profiles to investigate srivers' behavior on two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 2521, 3–11. <https://doi.org/10.3141/2521-01>
- Montella, A., & Imbriani, L. L. (2015). Safety performance functions incorporating design consistency variables. *Accident Analysis and Prevention*, 74, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.10.019>
- Ng, J. C W, & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218–227. <https://doi.org/10.1139/103-090>
- Ng, Joanne C.W, & Sayed, T. (2004). Effect of geometric design consistency on road safety. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(2), 218–227. <https://doi.org/10.1139/103-090>

- ONU. (2018). Organización de Desarrollo Estratégico.
- Pérez-Zuriaga, A. M., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2013). Tangent-to-curve transition on two-lane rural roads based on continuous speed profiles. *Journal of Transportation Engineering*, 139(11), 1048–1057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000583)
- Poe, C. M., Tarris, J. P., & Mason Jr, J. M. (1996). *Relationship of operating speeds to roadway geometric design speeds*. (No. FHWA-RD-96-024).
- Polus, A., & Dagan, D. (1987). Models for Evaluating the Consistency of Highway Alignment. *Transportation Research Record*, 1122(6), 10.
- Polus, A., & Mattar-Habib, C. (2004). New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety. *Journal of Transportation Engineering*, 130(3), 286–293. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(286\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(286))
- Posada, J. J., González, C., & Farbiaz, V. (2015). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. *ResearchGate*, 12. <https://doi.org/265571500>
- Solano, E. (2019). *TOPO 3*.
- Walpole, Myers, M. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (Novena). México: Pearson.
- Wooldridge, M., Fitzpatic, K., Harwood, D., Potts, I., Elefteriadou, L., & Torbic, D. (2003). *Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways*. WASHINGTON, D.C.: Transportation Research Board.
- Wu, K. F., Donnell, E. T., Himes, S. C., & Sasidharan, L. (2013). Exploring the association between traffic safety and geometric design consistency based on vehicle speed metrics. *Journal of Transportation Engineering*, 139(7), 738–748. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000553](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000553)

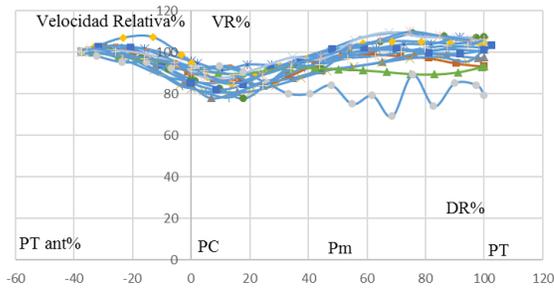
ANEXOS

Perfiles de velocidad de cada curva horizontal

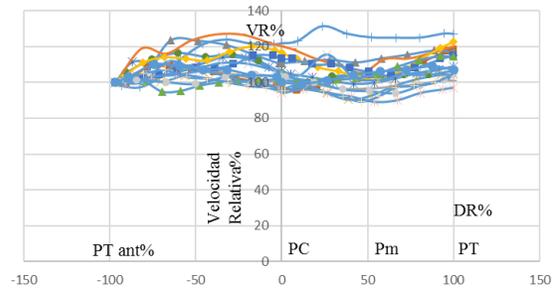




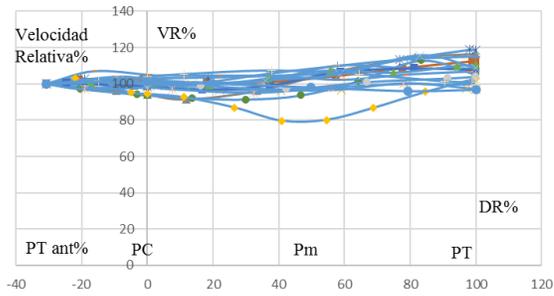
Curva 19



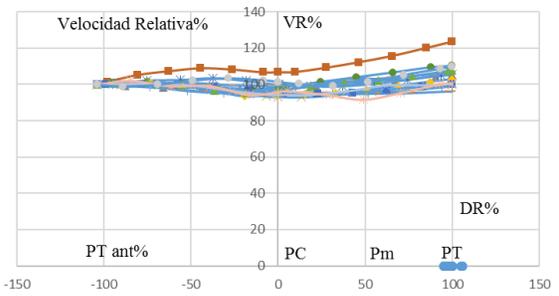
Curva 20



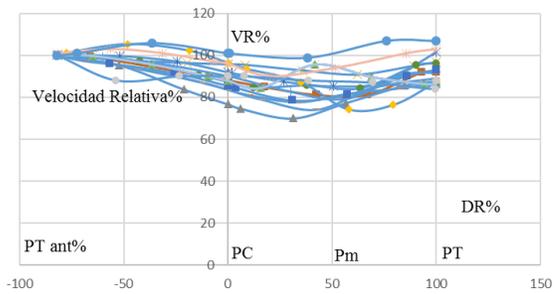
Curva 24



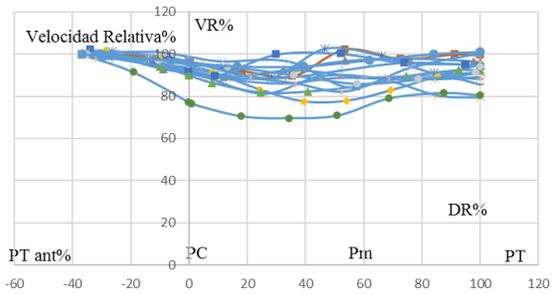
Curva 30



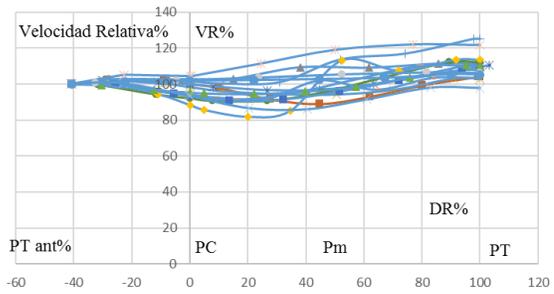
Curva 35



Curva 36



Curva 38



Curva 39

