



RELACIÓN ENTRE LAS VELOCIDADES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y DE
SEÑALIZACIÓN EN LA VÍA POPAYÁN-TOTORÓ (CAUCA)

AUTORES:

FABIÁN ANDRÉS NAVARRETE ARBELÁEZ
OLMIS ENRIQUE JUNIOR RAMOS CASTILLO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE VÍAS Y TRANSPORTE
POPAYAN ABRIL DE 2019

RELACIÓN ENTRE LAS VELOCIDADES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y DE
SEÑALIZACIÓN EN LA VÍA POPAYÁN-TOTORÓ (CAUCA)

AUTORES:

FABIÁN ANDRÉS NAVARRETE ARBELÁEZ
100413020730
OLMIS ENRIQUE JUNIOR RAMOS CASTILLO
100413020405

TRABAJO DE GRADO MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

ING. ALEXANDRA ROSAS PALOMINO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE VIAS Y TRANSPORTE
POPAYAN ABRIL DE 2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y los jurados han evaluado este documento, escuchando la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio, por lo cual autorizan a los egresados para que desarrollen las gestiones administrativas para optar al título de Ingeniero Civil.

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Director

Popayán, Abril 2019

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer primero que todo a Dios ya que con su gratitud siempre nos ha bendecido y nos ha mostrado un camino correcto para culminar con éxito este trabajo.

A nuestras familias quienes fueron nuestro apoyo a lo largo de nuestra formación profesional, especialmente a nuestros padres y hermanas los cuales siempre estuvieron presentes en momentos de dificultad facilitando cada uno de nuestros pasos.

A nuestra directora Alexandra Rosas por compartir su conocimiento y ayudarnos de manera atenta siempre. Por su acertada orientación y sugerencias las cuales fueron de gran importancia en el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Del Cauca por confiar en nosotros, abrir sus puertas y permitir nuestra formación académica.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 UBICACIÓN	4
1.5 OBJETIVOS	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 DEFINICIONES	6
2.1.1 Conceptos clave de velocidad	6
2.1.2 Consistencia del diseño geométrico y definiciones clave	8
2.2 ANTECEDENTES	11
2.2.1 Definiciones de velocidad en otros países	11
2.2.2 Método para establecer límites de velocidad en carreteras colombianas	12
3. DESARROLLO DEL TRABAJO	15
3.1 TRAMO DE ESTUDIO	15
3.2 EQUIPO UTILIZADO	18
3.3 OBTENCIÓN DE DATOS	20
3.3.1 Determinación del trazado de la vía y velocidades de los sujetos	22
3.3.2 Identificación de señales verticales de velocidad	22
3.3.3 Determinación de sitios especiales	28
4. PROCESAMIENTO DE DATOS	31
4.1 ELABORACIÓN DEL DISEÑO GEOMÉTRICO	31
4.2 ELABORACIÓN DE GRÁFICAS DE VELOCIDAD	33
4.3 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN LAS CURVAS	35
4.4 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN LAS ENTRETANGENCIAS	38
4.5 CÁLCULO DE VELOCIDADES ESPECÍFICAS INFERIDAS	40
4.6 RELACIÓN GRÁFICA ENTRE VELOCIDAD DE OPERACIÓN, VELOCIDAD LÍMITE EXISTENTE Y VELOCIDAD DE DISEÑO INFERIDA	43
4.7 RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE OPERACIÓN, SEÑALIZACIÓN DE TOPO3 Y PROGRAMA SEÑALES	45
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	48
5.1 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE OPERACIÓN, VELOCIDAD DE DISEÑO Y VELOCIDAD LÍMITE	48
5.2 PERFIL DE VELOCIDADES EN SENTIDO DEL ABSCISADO	49
5.3 PERFIL DE VELOCIDADES EN SENTIDO CONTRARIO AL ABSCISADO	59
5.4 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO (VELOCIDAD DE OPERACIÓN VS VELOCIDAD DE DISEÑO)	68
5.5 EVALUACIÓN DE LA DIFERENCIA DE VELOCIDAD ENTRE LA CURVA Y LA RECTA PRECEDENTE	71
5.6 ARBOL DE DECISIÓN	73

5.7 CONCLUSIONES77
6. BIBLIOGRAFÍA.....79

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: País, Departamento: Colombia, Cauca	4
Figura 2: Municipio de origen: Popayán.....	4
Figura 3: Lugar destino: Vía Totoró, Cauca.	4
Figura 4: Tramo estudiado: Popayán (Crucero) (PR 01)-Vía Totoró (PR08).....	4
Figura 5: Tramo estudiado	15
Figura 6: Sección transversal típica del tramo	16
Figura 7: Estado del tramo estudiado	16
Figura 8: GPS Mobile Mapper20 y antena.....	19
Figura 9: Especificaciones técnicas Mobile Mapper20.....	20
Figura 10: Procedimiento para toma de datos	21
Figura 11: Puntos GPS del recorrido.....	31
Figura 12: Diseño en planta del tramo estudiado.....	32
Figura 13: Parámetros generales de diseño	32
Figura 14: Hoja de cálculo tipo	33
Figura 15: Velocidad relativa vs distancia relativa del sujeto1 en la curva 26	34
Figura 16: Gráfica combinada de los 10 sujetos en la curva 26.....	34
Figura 17: Velocidades del sujeto 1 en la curva 26.....	35
Figura 18: Velocidad de operación, velocidad de diseño inferida y velocidades límites en sentido del abscisado	43
Figura 19: Relación de velocidad de operación, velocidad de diseño inferida y velocidad limite existente en sentido contrario al abscisado	44
Figura 20: Relación entre velocidad de operación, señalización de TOPO3 y programa SEÑALES en sentido del abscisado	46
Figura 21: Relación entre velocidad de operación, señalización de TOPO3 y programa SEÑALES en sentido contrario al abscisado.....	47
Figura 22: Perfil de velocidades en sentido del abscisado y relación con velocidad de operación.....	49
Figura 23: Deceleración forzada para tomar la curva 8	50
Figura 24: Velocidad de los sujetos entre la curva 7 y la curva 8.....	50
Figura 25: Deceleración forzada para tomar la curva 11	51
Figura 26: Velocidad de los sujetos al ingresar a la curva 11	51
Figura 27: Deceleración forzada para tomar la curva 13	52
Figura 28: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 13.....	52
Figura 29: Deceleración forzada para entrar en la curva 19	53
Figura 30: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 19.....	53
Figura 31: Deceleración forzada para entrar en la curva 21	54
Figura 32: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 21.....	54
Figura 33: Deceleración forzada para entrar a la curva 25	55
Figura 34: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 25	55
Figura 35: Deceleración forzada para entrar a la curva 27	56
Figura 36: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 27	56
Figura 37: Deceleración forzada de los sujetos para entrar en la curva 35	57

Figura 38: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 35	57
Figura 39: Deceleración forzada para tomar la curva 43	58
Figura 40: Perfil de velocidades en sentido contrario al abscisado.....	59
Figura 41: Deceleración forzada para tomar la curva 9	60
Figura 42: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 9.....	60
Figura 43: Deceleración forzada para entrar a la curva 14	61
Figura 44: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 14	61
Figura 45: Deceleración forzada para tomar la curva 22	62
Figura 46: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 22	62
Figura 47: Deceleración forzada para tomar la curva 25	63
Figura 48: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 25	63
Figura 49: Deceleración forzada para tomar la curva 28	64
Figura 50: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 28	64
Figura 51: Deceleración forzada para tomar la curva 32	65
Figura 52: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 32	65
Figura 53: Deceleración forzada para tomar la curva 35	66
Figura 54: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 35	66
Figura 55: Deceleración forzada para tomar la curva 39	67
Figura 56: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 39	67
Figura 57: Árbol de decisión para calificar la consistencia de diseño	75

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Definiciones de velocidades.....	11
Tabla 2: Curvas del tramo estudiado.....	17
Tabla 3: Señales verticales de velocidad existentes.....	22
Tabla 4: Registro fotográfico y descripción de las señales verticales existentes.....	23
Tabla 5: Resumen de los diferentes sitios especiales.....	28
Tabla 6: registro fotográfico de los sitios especiales en el tramo estudiado.....	28
Tabla 7: P_{85} del sujeto 1 en la curva 26.....	35
Tabla 8: Velocidades de operación de las curvas sentido del abscisado.....	36
Tabla 9: Velocidades de operación de las curvas sentido contrario al abscisado.....	37
Tabla 10: Velocidad de operación de las entretangencias sentido del abscisado.....	38
Tabla 11: Velocidades de operación de las entretangencias en sentido contrario al abscisado.....	39
Tabla 12: Radio (R_c) en función de la velocidad específica (V_{ch}) y peralte (e) para carreteras primarias y secundarias.....	41
Tabla 13: Velocidad específica inferida para las curvas del tramo estudiado.....	41
Tabla 14: Criterios de consistencia de diseño y diferencia de velocidad de elementos de diseño adyacentes.....	68
Tabla 15: Evaluación de la consistencia del diseño en el sentido del abscisado.....	68
Tabla 16: Evaluación de la consistencia del diseño en sentido contrario al abscisado.....	70
Tabla 17: Evaluación de la consistencia del diseño de los elementos adyacentes en el sentido del abscisado.....	71
Tabla 18: Evaluación de la consistencia de los elementos adyacentes en sentido contrario al abscisado.....	72
Tabla 19: Calificación general de la consistencia del diseño de las curvas en el tramo estudiado.....	75
Tabla 20: Calificación general de la consistencia del diseño de elementos adyacentes en el tramo estudiado.....	76

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el trazado vial se rige por el manual de diseño geométrico de carreteras (MDG-2008), el cual tiene como medida de partida la velocidad de diseño para limitar o ampliar las especificaciones de un trecho de carretera específico.

El trazado de una carretera está sujeto a unas medidas que buscan adaptar las variables propias del trayecto como son: la topografía, la categoría de la carretera, el nivel de servicio deseado, la economía del sector, entre otras características. En el proceso de asignación de la velocidad de diseño se debe otorgar la máxima prioridad a la seguridad de los usuarios. Por ello la velocidad de diseño a lo largo del trazado debe ser tal que los conductores no sean sorprendidos por cambios bruscos y/o muy frecuentes en la velocidad a la que pueden realizar con seguridad el recorrido (Murgueitio et al., 2008).

El diseñador, para garantizar la consistencia en la velocidad, debe identificar a lo largo del corredor de ruta tramos homogéneos a los que por las condiciones topográficas se les pueda asignar una misma velocidad. Esta velocidad, denominada velocidad de diseño del tramo homogéneo (V_{TR}), es la base para la definición de las características de los elementos geométricos incluidos en dicho tramo (Murgueitio et al., 2008).

El presente trabajo tiene como finalidad hacer una comparación entre la velocidad de diseño, la velocidad de operación y la velocidad límite en un tramo de carretera existente, y de esta manera realizar una evaluación de la consistencia del diseño, verificar la señalización vertical de velocidad y de ser necesario proponer los cambios adecuados a la velocidad límite existente.

Para comparar las velocidades se seleccionó como tramo de estudio los primeros ocho kilómetros de la vía Popayán-Totoró (Cauca) ruta 2602, teniendo en cuenta sus buenas especificaciones geométricas, la gran importancia a nivel nacional y regional y su flujo vehicular moderado.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la etapa de construcción de una carretera, dentro de la actividad final se encuentra la señalización, cuyo objeto es, mediante señales verticales y de piso, informar o prevenir al usuario condiciones que puede encontrar, evitando cambios de velocidad o trayectoria que afectan su seguridad.

Las señales verticales son la manera de dar a conocer al usuario la velocidad a la cual debe transitar (velocidad de operación máxima), para disminuir el riesgo de accidentes y circular con comodidad.

La implementación de señales de limitación debe corresponder a la velocidad especificada en el diseño geométrico. En ocasiones la señalización se hace de manera empírica, sin estudio, y el resultado no es óptimo.

Las entidades de control realizan mediciones de velocidad sancionando a quienes superen los límites expuestos en las señales verticales; en algunos casos esos límites no corresponden a lo requerido, pues las velocidades de operación media superan a las indicadas en la vía.

Siguiendo la idea anterior, el problema que se estudiará es la relación entre las velocidades de diseño, las velocidades límite y de operación, pues si el diseño es adecuado y se ha seguido a cabalidad el manual de diseño geométrico para carreteras colombianas, las velocidades antes mencionadas deberán ser acordes entre sí, es decir que los usuarios circularán a velocidades óptimas y con las condiciones de seguridad adecuadas.

En Colombia actualmente no existe un análisis de la relación entre las velocidades de operación, límite y diseño, caso contrario a países como Estados Unidos de América, el cual cuenta con numerosos estudios. Uno de los principales ponentes en estos casos es el Dr. Eric Donnell, reconocido investigador a nivel mundial, quien ha hecho grandes aportes al tema. En este trabajo de investigación se tendrán en cuenta sus publicaciones y artículos.

Como lo indica el informe sobre la situación mundial de la seguridad vial de la organización mundial de la salud, más del 90% de las víctimas mortales de los accidentes de tránsito que ocurren en el mundo corresponden a países de ingresos bajos y medios, que tan sólo tienen el 48% de los vehículos del mundo; en Colombia, Guatemala y Perú, más del 70% de las víctimas mortales son usuarios vulnerables de las vías de tránsito, mientras que en otros países de la región, como la República Dominicana, Honduras o los Estados Unidos, la proporción es considerablemente más baja: menor del 25% (Chan, 2009).

1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

En base a la formulación del problema este trabajo de investigación será dirigido a resolver las siguientes preguntas:

¿Las velocidades de diseño corresponden real y proporcionalmente a las que alcanzan los vehículos durante la operación?

¿Las señales verticales de velocidad están correctamente ubicadas en el tramo estudiado?

¿Las señales verticales de velocidad guían adecuadamente a los usuarios?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El tema se seleccionó para identificar posibles inconsistencias en las velocidades, utilizadas y permitidas, según el diseño geométrico de un tramo de carretera primaria de especificaciones estándar. Éste se localiza en la vía Popayán-Totoró entre los kilómetros uno (1) y ocho (8) correspondiente a la ruta 26 de la Transversal del Libertador, vía con mucha influencia económica y social para el país, por ser un paso de comunicación importante en el suroriente del territorio colombiano; también se caracteriza por tener unas especificaciones de diseño comunes en las carreteras de Colombia.

Si bien la señalización se debe hacer bajo la normatividad del Manual de señalización vial (2015), en ocasiones se hace de forma empírica, problema que motivó este trabajo de investigación. A esto se agrega que las autoridades de tránsito realizan amonestaciones a quienes no cumplen con los límites expuestos de velocidad en las señales verticales; pero ¿hasta qué punto esas señales responden a las velocidades de diseño y operación que realmente corresponden al tramo?

Colombia actualmente se encuentra en una etapa de crecimiento económico el cual es influenciado por la infraestructura vial, la calidad de la misma y la seguridad que ésta ofrece a los usuarios. Por ejemplo, un comerciante que debe cumplir con sus entregas de mercancía deberá tener la garantía de que la vía por la cual circulará cuenta con un buen diseño que asegure velocidades óptimas de recorrido sin dejar de lado la seguridad.

Al no existir un análisis de la relación entre la velocidad límite de operación y de diseño en Colombia se fortalece la necesidad de que estudios como éste sean pioneros en temas de seguridad vial, no sólo desde el punto de vista del diseño sino de cómo realmente se opera en condiciones reales.

1.4 UBICACIÓN

Las figuras 1, 2 y 3 presentan la ubicación geográfica de los municipios donde se realizó el estudio y la figura 4 presenta la vía Popayán-Totoró correspondiente a la transversal del libertador, ruta 2602 entre los kilómetros 1 y 8.

Figura 1: País, Departamento: Colombia, Cauca



Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cauca> (Colombia)

Figura 2: Municipio de origen: Popayán



Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Popayán>

Figura 3: Lugar destino: Vía Totoró, Cauca.



Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Totoró>

Figura 4: Tramo estudiado: Popayán (Crucero) (PR 01)-Vía Totoró (PR08)



Fuente: <http://hermes.invias.gov.co/carreteras/>

1.5 OBJETIVOS

A partir de la investigación y los resultados que se esperan obtener se identificaron los siguientes objetivos.

1.5.1 Objetivo general

- Establecer una relación entre las velocidades de diseño, operación y las existentes en las señales verticales del tramo Popayán-Totoró entre los kilómetros 1 y 8.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar los métodos de cómo se determinan las velocidades de diseño, operación y de señalización en un tramo de carretera.
- Aplicar cada método en el tramo de estudio
- Obtener una relación entre cada una de las velocidades determinadas y evidenciar si se mantienen las relaciones que habitualmente se utilizan de una velocidad en función de la otra.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIONES

2.1.1 Conceptos clave de velocidad

La relación entre la velocidad de diseño, la velocidad de operación y los límites de velocidad son consideraciones importantes en el diseño geométrico de autopistas y calles. Los diseñadores de autopistas establecen criterios de diseño geométrico utilizando una velocidad de diseño designada. El objetivo final es la compatibilidad entre la velocidad de diseño, la velocidad de operación y el límite de velocidad, o la armonía de la velocidad. El concepto de velocidad de diseño pretende dar como resultado velocidades de operación que son consistentes con la función prevista de la carretera o la calle y, por lo tanto, son favorables con respecto a la seguridad y la movilidad (Donnell, Himes, Porter, & Mahoney, 2009).

Debido a que la política de la asociación americana de oficiales de carreteras estatales y transportes (AASHTO por sus siglas en inglés, es el organismo que establece normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas en los Estados Unidos) sobre el diseño geométrico de las calles y carreteras recomienda el uso de valores de diseño superiores al mínimo para una velocidad de diseño designada y porque los conductores eligen operar sus vehículos de acuerdo con las limitaciones físicas y operacionales que se perciben a lo largo de una carretera, valores de diseño superiores a los mínimos pueden dar lugar a inconsistencias operativas (Donnell et al., 2009).

La discordancia de velocidad es una condición donde la velocidad de diseño es inferior al límite de velocidad señalizado, inferior a varias medidas de velocidad de operación, o ambas. Es posible que los diseñadores de carreteras no perciban una relación de este tipo como problemática, pero los usuarios pueden expresar inquietudes sobre el funcionamiento o la seguridad de los segmentos de carreteras que experimentan una discordia de la velocidad (Donnell et al., 2009).

Armonía de la velocidad: Condición que resulta cuando la velocidad de diseño está dentro de un rango específico (es decir, ± 8 km/h) de la velocidad de operación; la velocidad de operación está dentro de un rango especificado (es decir, ± 8 km/h) de la señal de velocidad límite. La velocidad de diseño inferida es igual o mayor que la velocidad de diseño designada; la señal de velocidad límite es menor o igual que la velocidad de diseño designada (Donnell et al., 2009).

Discordia de la velocidad: Diseño de la calzada que produce una condición donde la velocidad de diseño es menor que el límite de velocidad señalizado, varias medidas de velocidad de operación, o ambas (Donnell et al., 2009).

Señal vertical de velocidad: Velocidad máxima legal del vehículo para un lugar en particular como se muestra en una señal reglamentaria (Donnell et al., 2009).

Velocidad de diseño: Velocidad de Diseño del tramo homogéneo (V_{TR}): La Velocidad de Diseño de un tramo homogéneo (V_{TR}) está definida en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno (Murgueitio et al., 2008).

Velocidad específica: La velocidad específica de un elemento del trazado es la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de un elemento de trazado considerado aisladamente, en condiciones de comodidad y seguridad, cuando encontrándose el pavimento húmedo y los neumáticos en buen estado, las condiciones meteorológicas, del tráfico y legales son tales que no imponen limitaciones a la velocidad (Murgueitio et al., 2008).

Velocidad de diseño designada: Definida por la AASHTO como “una velocidad seleccionada utilizada para determinar las diversas características del diseño geométrico de la carretera”. La velocidad de diseño designada se usa explícitamente para determinar el mínimo valor para el radio de la curva horizontal y la distancia visual mínima requerida. La velocidad de diseño designada también se utiliza para determinar la tasa de peralte que corresponde a un radio de curva horizontal particular, así como la longitud mínima de la curva vertical (Donnell et al., 2009).

Esta corresponde a la velocidad específica (V_{CH}) del manual de diseño geométrico de carreteras de 2008.

Velocidad de diseño inferida: Velocidad máxima para la cual se cumplen todos los criterios críticos relacionados con la velocidad de diseño en una ubicación particular. La velocidad de diseño inferida se aplica sólo a las características y elementos que tienen un criterio basado en la velocidad de diseño (por ejemplo, la distancia de visibilidad horizontal y vertical, la curvatura horizontal). La velocidad de diseño inferida para una combinación de radio-peralte es la velocidad máxima para la cual no se excede el valor de fricción lateral basada en velocidad límite para la tasa de peralte y la velocidad de diseño inferida (determinada mediante un proceso iterativo) (Donnell et al., 2009).

Velocidad de operación: Se entiende como velocidad de operación de un determinado tramo de carretera, la velocidad segura y cómoda a la que un vehículo aislado circularía por él, de modo que la velocidad no sea condicionada por factores como la intensidad de tránsito o la meteorología, es decir, asumiendo un determinado nivel de velocidad en función solamente de las características físicas de la vía. También se puede interpretar como la velocidad a la que se observa que los conductores circulan. Usualmente se expresa la velocidad de operación como aquella velocidad a la cual, o por debajo de la cual, recorren el tramo el 85% de los conductores (Agudelo Ospina, 2002).

Velocidad de recorrido: Conocida también como velocidad de viaje, se obtiene dividiendo la distancia recorrida por un vehículo, desde el principio al fin del viaje, entre el tiempo total que emplea en recorrerla. En este tiempo se incluyen todas aquellas demoras operacionales debido a las condiciones del tránsito y los dispositivos de control, es decir todos los eventos ajenos a la voluntad del conductor (Agudelo Ospina, 2002).

2.1.2 Consistencia del diseño geométrico y definiciones clave

El diseño de una carretera, pese a ser abordado de forma separada en planta, perfil y en sección transversal, tiene como producto final una franja tridimensional en la cual la totalidad de sus elementos genera un conjunto único de interacción con los usuarios y determina las condiciones reales de operación (Murgueitio et al., 2008).

La aplicación de los criterios debe dar como resultado un diseño que cumpla con las siguientes condiciones (Murgueitio et al., 2008):

- Que el conductor pueda distinguir la superficie de rodadura así como obstáculos eventuales a una distancia suficiente para reaccionar adecuadamente.
- Que el conductor pueda avistar de manera oportuna los puntos particulares de interés como intersecciones, cruces, incorporaciones, etc.
- Tener una percepción continua de la evolución del trazado, evitando confusiones generadas por interrupciones en la geometría que podrían llevar a respuestas erróneas por parte de los conductores.
- Que el conjunto resultante del proceso de diseño sea agradable para los usuarios, que realce las condiciones estéticas de los sitios de influencia del recorrido, permitiendo con esto una operación menos monótona, y por consiguiente, se disminuya el riesgo de accidentalidad asociada al cansancio de los conductores.

Un mayor conocimiento y experiencia han demostrado que un diseño de carretera consistente, que pretende producir uniformidad de velocidad entre elementos de diseño geométrico sucesivos, puede producir un desempeño del conductor homogéneo y armonioso y reducir la probabilidad de eventos inesperados. Por otro lado, el diseño inconsistente de la calzada puede producir cambios inesperados en la velocidad de operación que pueden sorprender al conductor y llevar a errores de velocidad y/o trayectoria. Estas inconsistencias pueden aumentar la probabilidad de accidente.

Ahora es una práctica común utilizar la consistencia del diseño de carreteras como sustituto para evaluar el desempeño de seguridad de una carretera. Sin embargo, se ha llevado a cabo una investigación limitada sobre la relación entre la consistencia del diseño y la ocurrencia de accidentes (Donnell, Himes, Wu, & Sasidharan, 2012).

Carga de trabajo del conductor: Senders (1970) definió la carga de trabajo como una medida del esfuerzo realizado por un operador humano al realizar una tarea, independientemente del rendimiento de la tarea en sí. Se han propuesto medidas fisiológicas y subjetivas para medir la carga de trabajo del conductor (Krammes et al., 1995; Cafiso et al., 2004; Messer, 1980; Kannedalis, 1996; Smiley, 1989; Taylor y Thompson, 1977; Fueredy et al., 1992; Hager, 1995) (Donnell et al., 2012).

Comodidad (nivel de servicio): Refleja las condiciones operativas del tránsito vehicular en relación con variables tales como la velocidad y tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, la comodidad, los deseos del conductor y la seguridad vial (Murgueitio et al., 2008).

Índices de alineación: Los índices de alineación aplican métodos cuantitativos para evaluar el carácter general de una sección de calzada. Ejemplos de alineación horizontal e índices de alineación compuesta se reportan en la literatura de consistencia de diseño (por ejemplo, Krammes et al., 1995; Fitzpatrick et al., 2000; RAS, 1996; The South African National Agency Limited, 2003; Ministerio de Italia de Infraestructura y transporte, 2001; AASHTO, 2004; Polus y Dagan, 1987; Castro et al., 2005; Anderson et al., 1999). Las grandes diferencias en los valores del índice de alineación sobre una sección de evaluación indican inconsistencias en el diseño (Donnell et al., 2012).

Longitud de confirmación: Distancia máxima para una sección en la cual se debe recordar a los conductores la velocidad máxima permitida mediante la instalación reiterada de la señal que la define (Sánchez et al., 2010).

Longitud de transición: Distancia determinada para realizar la maniobra de desaceleración hasta llegar a un sitio de restricción (Sánchez et al., 2010).

Rendimiento de conducción: las evaluaciones de rendimiento de conducción se centran en los perfiles de velocidad de operación, trayectoria del vehículo, desaceleraciones longitudinales del vehículo o aceleraciones transversales de vehículos entre elementos de carreteras adyacentes. Las investigaciones han demostrado que los cambios inesperados en la alineación de las carreteras están asociados con cambios abruptos en la velocidad de operación del vehículo (Lamm et al., 1988; 1999; 2002; 2006; Donnell et al., 2009b); (Donnell et al., 2012).

Sección: Parte de un sector con tratamiento homogéneo desde el punto de vista de la señalización de límite de velocidad (Sánchez et al., 2010).

Sector: Parte de un tramo con características geométricas homogéneas (Sánchez et al., 2010).

Seguridad vial: La seguridad vial es el conjunto de acciones y mecanismos que garantizan el buen funcionamiento de la circulación del tránsito, mediante la utilización de conocimientos (leyes, reglamento y disposiciones) y normas de conducta, bien sea como peatón, pasajero o conductor, a fin de usar correctamente la vía pública previniendo los accidentes de tránsito (“¿Qué es seguridad vial?,” 2013).

Sitio de restricción: Lugar dentro de la sección, con una longitud definida dentro de la misma, para el cual se presentan restricciones a la velocidad asociadas a factores geométricos de la vía o externos a ella (Sánchez et al., 2010).

Tramo: Un tramo de carretera corresponde a cada una de las divisiones administrativas establecidas por el Instituto Nacional de Vías en el sistema de Nomenclatura Vial, o a la parte de carretera sobre la que se van a determinar los límites de velocidad (Sánchez et al., 2010).

Los cambios en las velocidades de operación del vehículo pueden ser un indicador notable de inconsistencias del diseño geométrico (Nicholson, 1994). Como ejemplo, se ha demostrado que la reducción de velocidad en una curva horizontal en relación con la curva o tangente anterior está asociada con la frecuencia de choque (Fitzpatrick et al., 2000). La velocidad de operación generalmente se expresa como la velocidad del percentil 85, seleccionada por los conductores cuando no está restringida por otros usuarios (es decir, bajo condiciones de flujo libre). Varios países incorporan consideraciones de consistencia de velocidad de operación en sus políticas de diseño, como Suiza (Asociación Suiza de Especialistas de Carreteras), Alemania (Asociación Alemana de Investigación de Carreteras y Transportes, 1996), Australia (Ausroads, Oficina Nacional, 1989), Canadá (Asociación de Transportes de Canadian roads, 1999) y Sudáfrica (The South African National Agency Limited, 2003). Cuando la diferencia entre la velocidad de operación, V_{85} y la velocidad de diseño, V_{Design} , es inferior a 10 kilómetros por hora (kph) [6 millas por hora (mph)] en un elemento, se considera "buena". Se produce una calificación de "pobre" cuando la diferencia entre la velocidad de operación y de diseño supera los 20 km / h (12 mph).

Otro criterio es comparar la diferencia de velocidad de operación entre elementos adyacentes. Una diferencia de menos de 10 kph (6 mph) entre la velocidad de operación en un elemento tangente, V_{85} , Tangente y la velocidad de operación en un elemento de curva horizontal / vertical adyacente, V_{85} , Curva, se considera "buena", pero se considera "pobre" si la diferencia es mayor a 20 kph (12 mph) (Donnell et al., 2012).

2.2 ANTECEDENTES

2.2.1 Definiciones de velocidad en otros países

La tabla 1 muestra las definiciones de los distintos tipos de velocidades que se han adoptado en países como Estados Unidos de América, Ecuador y Perú.

Tabla 1: Definiciones de velocidades

Estados Unidos	
Velocidad de Diseño	Es la máxima velocidad razonablemente uniforme que sería aprobado por el grupo más rápido manejo de operación de vehículos, lejos de zonas urbanas. La velocidad de diseño es una velocidad seleccionada para determinar las distintas características de diseño geométrico de la carretera (AASHTO, 2011).
Velocidad de Operación	Es la velocidad a la que los conductores operan sus vehículos durante condiciones de flujo libre, y corresponde al percentil 85 de la distribución de las velocidades observadas asociada a un determinado lugar o característica geométrica (AASHTO, 2011).
Velocidad Media / Marcha	La suma de las velocidades instantáneas en una localización específica dividida por el número de vehículos observados. La velocidad máxima dentro de un rango específico de velocidades que representa más vehículos que en cualquier otro como gama de la velocidad. La gama de velocidades típicamente utilizado es 10 km/h o 10 millas por hora (AASHTO, 2011).
Ecuador	
Velocidad de Diseño	Es la velocidad máxima a la cual los vehículos pueden circular con seguridad sobre un camino cuando las condiciones atmosféricas y del tránsito son favorables. Esta velocidad se elige en función de las condiciones físicas y topográficas del terreno, de la importancia del camino, los volúmenes del tránsito y uso de la tierra, tratando de que su valor sea el máximo compatible con la seguridad, eficiencia, desplazamiento y movilidad de los vehículos (Manzano, 2003).
Velocidad de Operación	Es la velocidad real de un vehículo a lo largo de una sección específica de carretera y es igual a la distancia recorrida

	dividida para el tiempo de circulación del vehículo, o a la suma de las distancias recorridas por todos los vehículos o por un grupo determinado de ellos, dividida entre la suma de los tiempos de recorrido correspondientes (También llamada velocidad de circulación) (Manzano, 2003).
Velocidad Media / Marcha	No está definida.
Perú	
Velocidad de Diseño	Es la velocidad escogida para el diseño, entendiéndose que será la máxima que se podrá mantener con seguridad y comodidad, sobre una sección determinada de la carretera, cuando las circunstancias sean favorables para que prevalezcan las condiciones de diseño (Paredes, 2014).
Velocidad de Operación	Es la velocidad máxima a la que pueden circular los vehículos en un determinado tramo de una carretera, en función a la velocidad de diseño, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, estado del pavimento, meteorológicas y grado de relación de ésta con otras vías y con la propiedad adyacente (Paredes, 2014).
Velocidad Media / Marcha	Denominada también velocidad de crucero, es el resultado de dividir la distancia recorrida entre el tiempo durante el cual el vehículo estuvo en movimiento, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, la vía y los dispositivos de control. Es una medida de la calidad del servicio que una vía proporciona a los conductores y varía durante el día, principalmente, por la modificación de los volúmenes de tránsito (Paredes, 2014).

2.2.2 Método para establecer límites de velocidad en carreteras colombianas

Dividir el tramo en sectores: El tramo se divide en varios sectores de geometría homogénea identificados por sus PRs de inicio y fin teniendo en cuenta principalmente factores de tipo geométrico, para lo que es fundamental el conocimiento de la vía. Para obtener mejores resultados en la sectorización del tramo, es recomendable recorrerlo e identificar los distintos tipos de terreno de la vía. En este recorrido también se ubican o identifican curvas restrictivas, que son aquéllas en las cuales por efecto de la combinación del radio de curvatura y la deflexión total, es necesario reducir la velocidad a fin de evitar accidentes por pérdida de estabilidad del vehículo. Estas curvas se relacionan en un formato con su ubicación aproximada y posteriormente con la información geométrica detallada se definen sus parámetros precisos (Sánchez et al., 2010).

Asignar una velocidad genérica a cada sector: A cada uno de los sectores se le asigna una velocidad genérica teniendo en cuenta la presencia de zonas laterales despejadas, peatones y accesos controlados (Sánchez et al., 2010).

Conviene tener en cuenta las siguientes definiciones (Sánchez et al., 2010):

- Zona despejada o zona perdonante. Área segura disponible para el uso de vehículos errantes y/o fuera de control con diseño traspasable.
- Accesos controlados. Consiste en regular la entrada directa de vehículos a la vía principal; en algunos casos se recomienda construir una vía paralela que recoja todo el tráfico de las vías secundarias y lo conduzca al sistema vial principal, al que se incorpora mediante intersecciones a desnivel.
- Control parcial de accesos. Consiste en regular la entrada directa de vehículos a la vía principal, y permitirla sólo en sitios determinados que cumplen con parámetros de seguridad, incluyendo carriles de aceleración y deceleración.
- Sin concentración de peatones. Sitios en los cuales el flujo peatonal es bajo y no se presentan grupos de personas que cruzan con frecuencia la vía.

Ubicar y asignar velocidad a sitios especiales: En cada sector se deben identificar y ubicar los sitios en los que se producen condiciones especiales de velocidad, y asignarles las velocidades de paso (Sánchez et al., 2010).

Ajuste de la velocidad genérica en el sector: La velocidad genérica en el sector se ajusta teniendo en cuenta la velocidad de operación en el mismo, la cual se obtiene mediante la medición de velocidades con radar. Una vez tomadas y procesadas las velocidades medidas en campo se obtiene la velocidad de operación (percentil 85 de las velocidades), la cual permite ajustar la velocidad genérica del sector. Por último, la velocidad resultante de este ajuste será la que asignemos como la velocidad máxima en cada uno de los sectores estudiados (Sánchez et al., 2010).

Transición de velocidades y señales de confirmación: En general, las señales se ubicarán siguiendo los criterios descritos en el Manual de Señalización del Ministerio de Transporte que se encuentre vigente en el momento de realizar el trabajo, el cual es el del 2015 (Sánchez et al., 2010).

Uso del programa señales: El programa de computador “SEÑALES” fue desarrollado como una herramienta de apoyo para aplicar la metodología de determinación de límites de velocidad. El programa permite guardar la información geométrica de la vía, los parámetros de diseño, los datos de velocidades (las mediciones de campo), procesar y obtener la velocidad de operación y diseñar la señalización según los criterios definidos, generando esquemas y listados con la ubicación de las señales de velocidad y la demarcación de zonas de adelantamiento (Sánchez et al., 2010).

3. DESARROLLO DEL TRABAJO

A continuación se explica cómo se desarrolló este trabajo de investigación, empezando por la ubicación del tramo de estudio, el equipo utilizado y el procedimiento para tomar los datos.

3.1 TRAMO DE ESTUDIO

La figura 5 muestra el tramo de carretera en el que se realizó el trabajo, que corresponde a la vía Popayán-Totoró entre los kilómetros 1 y 8.

Figura 5: Tramo estudiado



Fuente: <http://hermes.invias.gov.co/carreteras/>

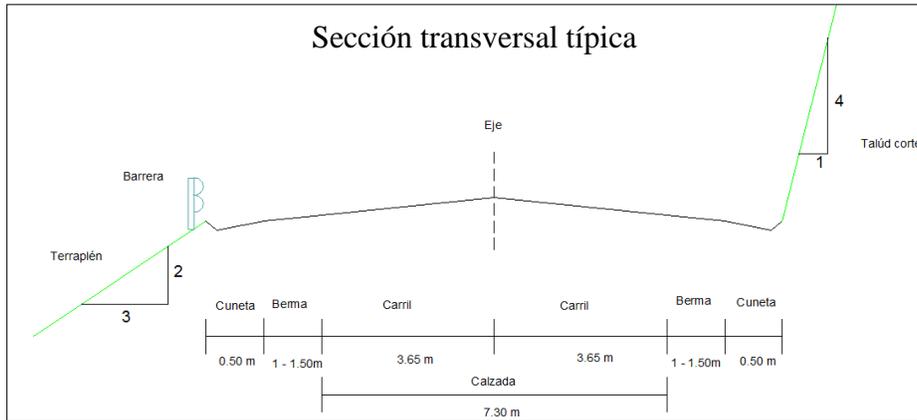
El trabajo se realizó con base en los datos tomados para el proyecto de investigación “Determinación de la velocidad específica en curvas horizontales en terreno montañoso” que está realizando la ingeniera Alexandra Rosas, estudiante de maestría en ingeniería de vías terrestres de la Universidad del Cauca, entre el kilómetro 1 y el km 8 de la transversal del libertador, en la vía Popayán-Totoró.

Se analizaron 46 curvas en ambos sentidos, con radios de curvatura entre 36 y 1200 m, deflexiones entre 4° y 160° y entretangencias cortas, con un máximo aproximado de 330 m.

La medición de velocidades se hizo mediante un receptor de sistema de posicionamiento global GPS cartográfico, a bordo de un vehículo estándar, con un conductor diferente en cada recorrido (sujeto), y se registraron las velocidades mediante distancia recorrida en un segundo.

El tramo de estudio es una vía principal que comunica a los departamentos del Cauca y Huila; la superficie de rodadura es un pavimento flexible en buenas condiciones, la sección transversal típica está compuesta por una calzada de dos sentidos, cada carril mide 3.65 metros, bermas de 1 a 1.5 metros, y las cunetas son de tipo triangular de aproximadamente 0.50 metros, como se muestra en la figura 6. La figura 7 muestra una imagen del tramo en estudio.

Figura 6: Sección transversal típica del tramo



Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Estado del tramo estudiado



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al tránsito promedio diario (TPD) de la vía Crucero – Totoró, según la serie histórica del INVIAS, fue de 1140 vehículos en el año 2016.

La tabla 2 muestra los elementos del diseño en planta del tramo estudiado.

Tabla 2: Curvas del tramo estudiado

PI #	Delta g,m,s,ID	Radio (m)	Abscisa PC (m)	Abscisa PT (m)	Longitud de la curva (m)	Entretangente (m)
K0+000						
1	7,44,24 I	1284	56.539	229.994	173.455	-
2	4,8,55 D	878	291.31	354.885	63.575	61.316
3	23,19,44 D	335	466.96	603.361	136.4	112.075
4	21,28,58 I	98	934.961	971.706	36.744	331.6
5	26,36,29 D	124	1060.502	1118.087	57.585	88.796
6	18,25,35 I	242	1190.277	1268.104	77.827	72.19
7	43,0,1 D	137	1597.946	1700.764	102.818	329.842
8	97,44,23 I	47	1780.116	1860.292	80.176	79.352
9	81,45,31 I	41	1867.06	1925.565	58.505	6.768
10	64,48,4 D	115	2068.111	2198.175	130.064	142.546
11	44,43,16 I	67	2250.819	2303.115	52.296	52.644
12	35,19,35 I	118	2424.656	2497.41	72.754	121.541
13	107,19,59 D	39	2548.602	2621.662	73.059	51.192
14	92,13,6 D	36	2621.767	2679.71	57.943	0.105
15	30,46,5 I	194	2832.308	2936.487	104.179	152.598
16	42,27,30 D	170	2961.548	3087.525	125.977	25.061
17	18,23,25 I	367	3169.684	3287.481	117.797	82.159
18	28,13,13 I	214	3595.261	3700.664	105.403	307.78
19	59,25,57 I	95	3767.808	3866.351	98.543	67.144
20	74,14,25 D	102	3937.061	4069.226	132.165	70.71
21	82,7,50 I	52	4197.088	4271.628	74.539	127.862
22	41,39,46 D	53	4290.191	4328.73	38.539	18.563
23	30,39,53 D	81	4386.365	4429.716	43.351	57.635
24	60,11,48 I	70	4455.458	4529.002	73.544	25.742
25	95,38,29 D	43	4551.557	4623.335	71.778	22.555
26	31,5,8 D	101	4737.354	4792.151	54.797	114.019
27	164,32,19 I	44	4862.243	4988.599	126.357	70.092
28	131,45,39 D	38	5118.01	5205.397	87.387	129.411
29	36,0,38 I	122	5253.315	5329.992	76.677	47.918
30	46,0,50 D	110	5515.463	5603.803	88.34	185.471

PI #	Delta g,m,s,ID	Radio (m)	Abscisa PC (m)	Abscisa PT (m)	Longitud de la curva (m)	Entretangente (m)
31	45,59,12 I	159	5695.398	5823.014	127.616	91.595
32	108,27,50 I	70	6017.114	6149.628	132.514	194.1
33	93,25,17 D	141	6330.784	6560.686	229.902	181.156
34	33,22,55 D	90	6767.321	6819.757	52.436	206.635
35	68,26,54 I	45	6863.644	6917.403	53.759	43.887
36	62,55,33 D	78	6961.529	7047.193	85.664	44.126
37	32,21,43 D	143	7078.654	7159.424	80.77	31.461
38	65,12,47 D	68	7220.308	7297.704	77.396	60.884
39	61,5,4 I	68	7329.221	7401.718	72.496	31.517
40	27,42,37 D	109	7524.271	7576.987	52.716	122.553
41	54,29,31 I	82	7638.856	7716.844	77.987	61.869
42	49,20,18 D	76	7772.226	7837.671	65.445	55.382
43	86,43,47 I	47	7892.587	7963.732	71.145	54.916
44	44,50,14 D	179	8038.64	8178.717	140.078	74.908
45	13,17,4 D	1016	8230.067	8465.634	235.567	51.35
46	26,4,54 D	474	8471.048	8686.818	215.77	5.414
K8+853.507						

3.2 EQUIPO UTILIZADO

Se utilizó un equipo receptor GPS cartográfico de alta precisión para tomar los datos de las señales existentes, ubicación de sitios especiales y registrar los recorridos realizados por los diferentes sujetos. En cada recorrido se midieron tiempo y distancia, lo que permitió calcular velocidad y relacionarla con el trazado.

En la figura 8 se muestra el receptor cartográfico de alta precisión utilizado.

Figura 8: GPS Mobile Mapper20 y antena



Fuente: Elaboración propia

La figura 9 muestra las especificaciones técnicas del equipo utilizado para obtener los diferentes datos.

Figura 9: Especificaciones técnicas Mobile Mapper20

<p>Especificaciones GNSS</p> <ul style="list-style-type: none"> Antena interna: 20 canales <ul style="list-style-type: none"> - GPS L1 C/A - SBAS: WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN Conector de la antena externa Salida NMEA <p>Especificaciones de precisión (RMS horizontal)¹</p> <ul style="list-style-type: none"> SBAS Tiempo real: < 2 m típico Posprocesado: < 50 cm típico <p>Procesador</p> <ul style="list-style-type: none"> ARM9™ Posprocesado: < 50 cm típico <p>Sistema operativo</p> <ul style="list-style-type: none"> Microsoft® Windows Embedded Handheld 6.5 Idiomas disponibles: alemán, chino simplificado, coreano, español, francés, inglés, italiano, japonés y portugués El paquete de software incluye: <ul style="list-style-type: none"> - Internet Explorer® - Office Mobile - ActiveSync® - Transcriptor (reconocimiento de escritura) <p>Comunicaciones</p> <p>Celular</p> <ul style="list-style-type: none"> Antena GSM/GPRS/HSPA (3.5G) integrada <p>Versiones de módulo</p> <ul style="list-style-type: none"> P/N 802168-00: 3,5 G: 900/2.100 MHz; 2 G: 850/900 /1.800 MHz P/N 802168-10: 3,5 G: 850/900 MHz; 2 G: 850/900/1.800/1.900 MHz <p>Bluetooth</p> <ul style="list-style-type: none"> Bluetooth 2.1 con EDR <p>Wi-Fi</p> <ul style="list-style-type: none"> Integrada <p>Interfaz</p> <ul style="list-style-type: none"> USB 	<p>Características físicas</p> <p>Tamaño</p> <ul style="list-style-type: none"> 169 x 88 x 25 mm <p>Peso</p> <ul style="list-style-type: none"> 380 g con batería (310 g sin batería) <p>Interfaz de usuario</p> <p>Teclado</p> <ul style="list-style-type: none"> Navegación de cuatro direcciones, menú, teclas contextuales Teclado iluminado con pantalla táctil Teclado virtual <p>Pantalla</p> <ul style="list-style-type: none"> Pantalla táctil TFT VGA a color de alta resolución, antirreflectante y con retroiluminación por LED. Dimensiones: 3,5" Colores: 262.000 <p>Memoria</p> <ul style="list-style-type: none"> SDRAM de 256 MB Almacenamiento: 512 MB NAND Flash (no volátil) Tarjeta de memoria MicroSDHC™ (hasta 32 GB, se recomienda usar las marcas SanDisk® o Kingston®) <p>Características ambientales</p> <ul style="list-style-type: none"> Temperatura de funcionamiento: De -10 °C a +60 °C Temperatura de almacenamiento: De -30 a +70 °C sin batería Humedad: 95% sin condensación Resistente al agua: IP54 Calda libre: 1,2 m sobre hormigón <p>Características de alimentación</p> <ul style="list-style-type: none"> Duración de la batería: > 20 h a 20 °C con el GPS activado² Tiempo de carga: 4 horas Batería extraíble 	<p>Multimedia y sensores</p> <ul style="list-style-type: none"> Cámara de 5 MPx Brújula electrónica Sensor-G Altavoz Micrófono <p>Opciones del programa</p> <ul style="list-style-type: none"> Software Spectra Precision MobileMapper Field y OfficeBrújula electrónica Posprocesado Paquete de software ESRI® ArcPad® (sólo EE.UU.) <p>Accesorios estándar</p> <ul style="list-style-type: none"> Lápiz Correa de mano Cargador de CA Cable USB <p>Accesorios opcionales</p> <ul style="list-style-type: none"> Antena GPS magnética externa Soporte para poste <p><small>¹ Precisión portátil alcanzada en buenas condiciones (a cielo abierto) con PDOP <3 y más de siete satélites a la vista.</small></p> <p><small>² GPS activado, con las conexiones Bluetooth y WiFi desactivadas, retroiluminación usada el 20% del tiempo al ajuste mínimo.</small></p> <p><small>* Incluyendo las opciones disponibles.</small></p>
--	---	--

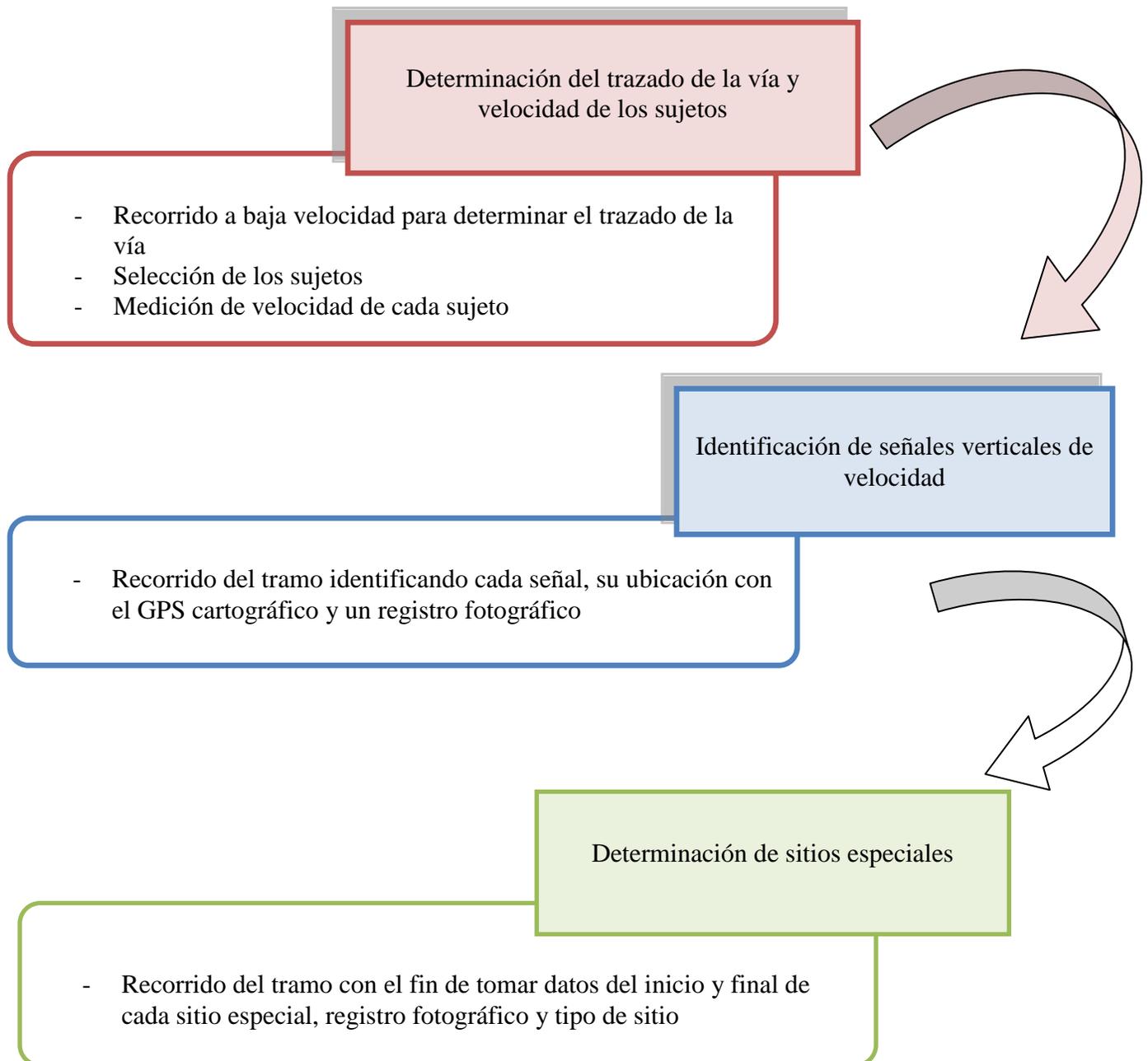
Fuente: http://www.geosystemsperu.com/soporte/archivos_equipos/Catalogo_ESP_SP_M20.pdf

3.3 OBTENCIÓN DE DATOS

Para minimizar la dispersión de información se utilizó el mismo vehículo con diferente conductor; se trata de un vehículo tipo automóvil de modelo reciente en buenas condiciones mecánicas. Los recorridos se realizaron con condiciones climáticas óptimas (tiempo seco, durante el día y con buena visibilidad) y a flujo libre.

La figura 10 muestra el procedimiento seguido para la obtención de datos.

Figura 10: Procedimiento para toma de datos



3.3.1 Determinación del trazado de la vía y velocidades de los sujetos

- En primera instancia se realizó un recorrido a baja velocidad para obtener la geometría de la carretera con el receptor GPS.
- Se seleccionaron 10 sujetos de diferente edad y sexo para cada recorrido de ida y vuelta, según el procedimiento utilizado en el trabajo de investigación de la determinación de la velocidad específica de curvas horizontales en carreteras rurales sobre terreno montañoso realizado por la ingeniera Alexandra Rosas Palomino.
- Antes de iniciar cada recorrido se configuró el receptor GPS mobile mapper para que tomara datos en intervalos de tiempo de 1 segundo.
- La antena magnética del GPS se ubicaba en el techo del vehículo para optimizar la precisión.
- Cada recorrido se realizó desde 500 metros antes hasta 500 metros después del tramo estudiado, para no forzar a los sujetos de prueba a cambiar su velocidad de forma irregular.

3.3.2 Identificación de señales verticales de velocidad

- Para registrar qué señales de velocidad (SR-30) hay en el tramo se hizo un recorrido identificando cada una de ellas, su ubicación con el GPS (10 segundos en cada señal para optimizar la precisión del GPS), y un registro fotográfico de cada una.

Los datos de señales verticales de velocidad se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Señales verticales de velocidad existentes

Punto	Velocidad límite	Identificador	Coordenadas		Abscisa	Lado
			Norte	Este		
1	30	SR-30	769437.2768	1059469.81	K0+163	Derecha
2	40	SR-30	769567.1028	1060990.185	K1+723	Derecha
3	40	SR-30	770149.6687	1060743.38	K2+640	Derecha
4	50	SR-30	770083.1349	1060847.459	K2+780	Derecha
5	60	SR-30	769808.9738	1061254.662	K3+280	Derecha
6	40	SR-30	769721.8427	1062014.311	K4+160	Derecha
7	40	SR-30	769850.3489	1062357.168	K4+550	Derecha
8	40	SR-30	769659.7742	1062630.325	K4+970	Derecha

Punto	Velocidad límite	Identificador	Coordenadas		Abscisa	Lado
			Norte	Este		
9	60	SR-30	769754.4842	1062823.538	K5+355	Derecha
10	40	SR-30	769639.0861	1063101.927	K5+685	Derecha
11	50	SR-30	769690.1055	1063481.525	K6+200	Derecha
12	40	SR-30	770005.1975	1063813.074	K6+810	Derecha
13	50	SR-30	769981.7163	1064114.08	K7+165	Derecha
14	30	SR-30	769688.5509	1064208.085	K7+500	Derecha
15	40	SR-30	769598.1938	1064241.058	K7+600	Derecha
16	30	SR-30	769601.9617	1064253.538	K7+600	Izquierda
17	50	SR-30	769684.5051	1064225.213	K7+510	Izquierda
18	40	SR-30	769899.002	1064174.553	K7+270	Izquierda
19	40	SR-30	769994.6976	1064118.985	K7+155	Izquierda
20	50	SR-30	770011.5829	1063815.169	K6+810	Izquierda
21	30	SR-30	769760.8604	1063456.888	K6+275	Izquierda
22	40	SR-30	769688.6511	1063474.844	K6+200	Izquierda
23	60	SR-30	769558.1765	1063386.502	K5+985	Izquierda
24	40	SR-30	769674.9554	1062619.749	K4+980	Izquierda
25	30	SR-30	769810.9542	1062177.232	K4+360	Izquierda
26	60	SR-30	769732.0901	1062012.614	K4+160	Izquierda
27	50	SR-30	769823.6854	1061261.334	K3+280	Izquierda
28	40	SR-30	770100.6981	1060846.498	K2+765	Izquierda
29	50	SR-30	770155.8919	1060729.156	K2+640	Izquierda
30	40	SR-30	769634.3603	1061070.198	K1+945	Izquierda
31	60	SR-30	769581.6698	1060996.906	K1+723	Izquierda
32	50	SR-30	769564.4503	1060008.949	K0+723	Izquierda
33	60	SR-30	769552.4105	1060007.358	K0+723	Derecha

La tabla 4 muestra el registro fotográfico de las señales verticales de velocidad y el estado en que se encuentran.

Tabla 4: Registro fotográfico y descripción de las señales verticales existentes.

Punto	Velocidad límite	Descripción	Registro fotográfico
1	30	Señal en buen estado.	

Punto	Velocidad límite	Descripción	Registro fotográfico
2	40	Señal en buen estado.	
3	40	Señal en buen estado.	
4	50	Señal en buen estado.	
5	60	Señal en buen estado con pequeños detalles de pintura pero que no afectan su legibilidad.	
6	40	Señal en buen estado.	
7	40	Señal en buen estado.	
8	40	Señal en buen estado.	
9	60	Señal en buen estado.	
10	40	Señal obstruida por un pequeño árbol, presenta algunos detalles con pintura y el tamaño de los números no corresponde a los que se	

Punto	Velocidad límite	Descripción	Registro fotográfico
		deben usar en este tipo de vías.	
11	50	Señal en buen estado.	
12	40	Señal en buen estado.	
13	50	Señal en buen estado.	
14	30	Señal en buen estado.	
15	40	Señal en buen estado.	
16	30	Señal en buen estado.	
17	50	Señal en buen estado.	
18	40	El tamaño de los números no es el adecuado para usar en este tipo de vías.	

Punto	Velocidad límite	Descripción	Registro fotográfico
19	40	Señal en buen estado.	
20	50	Señal en buen estado.	
21	30	El tamaño de los números no es el adecuado para usar en este tipo de vías.	
22	40	Señal en buen estado.	
23	60	Señal en buen estado.	
24	40	Señal en buen estado, se encuentra un poco inclinada a la derecha pero no afecta la legibilidad.	
25	30	Señal en buen estado.	
26	60	Señal en buen estado.	

Punto	Velocidad límite	Descripción	Registro fotográfico
27	50	Señal en buen estado.	
28	40	Señal en buen estado.	
29	50	Señal en buen estado.	
30	40	Señal en buen estado.	
31	60	Señal en buen estado.	
32	50	Señal en buen estado con pequeños detalles de pintura pero que no afectan su legibilidad.	
33	60	Señal en buen estado con algunos detalles de pintura pero que no afectan su legibilidad.	

Fuente imágenes: Elaboración propia

3.3.3 Determinación de sitios especiales

Para identificar y ubicar los sitios especiales se realizó otro recorrido donde se tomaron datos del inicio y fin de cada uno, con su descripción. La tabla 5 contiene las coordenadas y abscisas de cada sitio especial, y la tabla 6 el registro fotográfico.

Tabla 5: Resumen de los diferentes sitios especiales

Punto	Descripción	Identificador	Coordenadas		Abscisa
			Norte	Este	
1	Puente	Sitio especial	769562.1409	1061012.605	K1+800 a K1+880
2	Zona urbana	Sitio especial	770107.9546	1060819.201	K2+750 a K3+400
3	Depresión	Sitio especial	769562.2171	1063273.303	K5+870 a K5+880
4	Estadero	Sitio especial	769671.661	1063478.445	K6+150 a K6+180
5	Zona escolar	Sitio especial	769668.4135	1064229.147	K7+500 a K7+600

Tabla 6: registro fotográfico de los sitios especiales en el tramo estudiado

Punto	Descripción	Registro fotográfico
1	Puente sobre la quebrada San Benito.	

Punto	Descripción	Registro fotográfico
2	Zona urbana.	
3	Depresión en la vía producto de un box coulvert.	
4	Estadero restaurante en una de las curvas del tramo estudiado.	

Punto	Descripción	Registro fotográfico
5	Zona escolar.	

Fuente imágenes: Elaboración propia

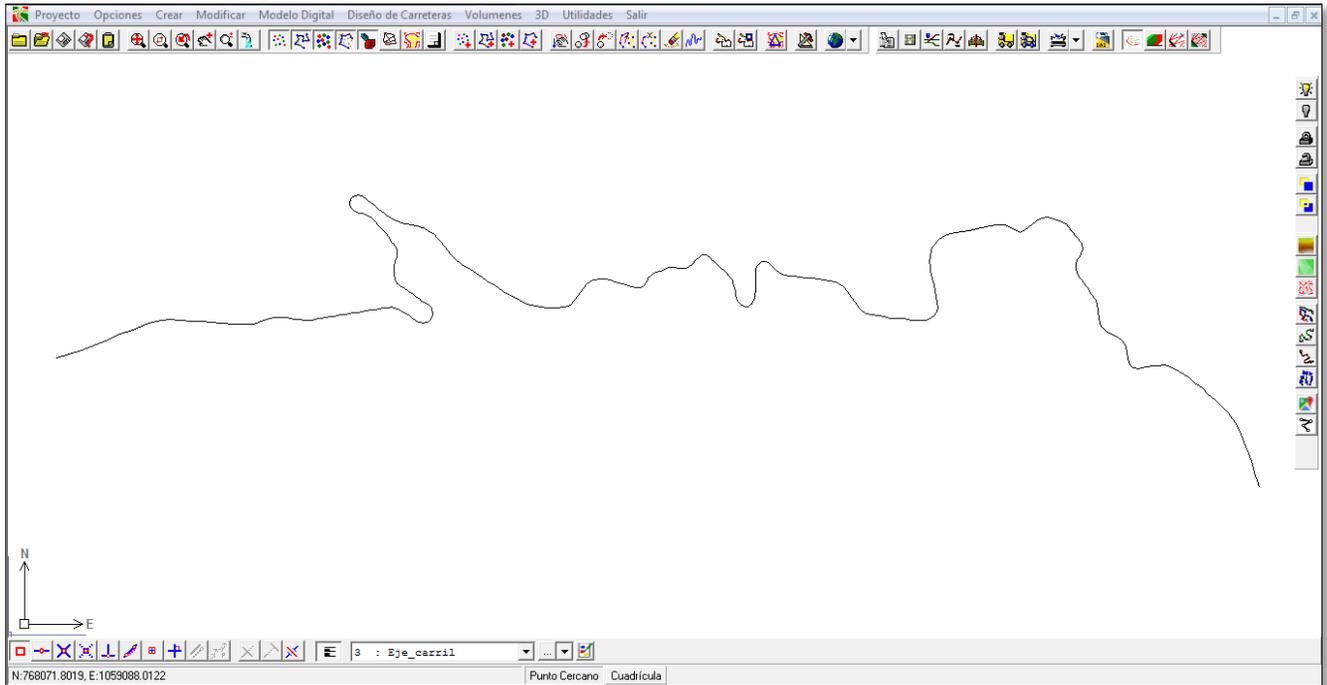
4. PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 ELABORACIÓN DEL DISEÑO GEOMÉTRICO

A partir del trabajo de investigación de la determinación de la velocidad específica de curvas horizontales en carreteras rurales sobre terreno montañoso de la ingeniera Alexandra Rosas Palomino, se realizó el diseño geométrico basándose en los recorridos hechos con el GPS; a continuación se describen los pasos básicos que se realizaron en el programa TOPO3.

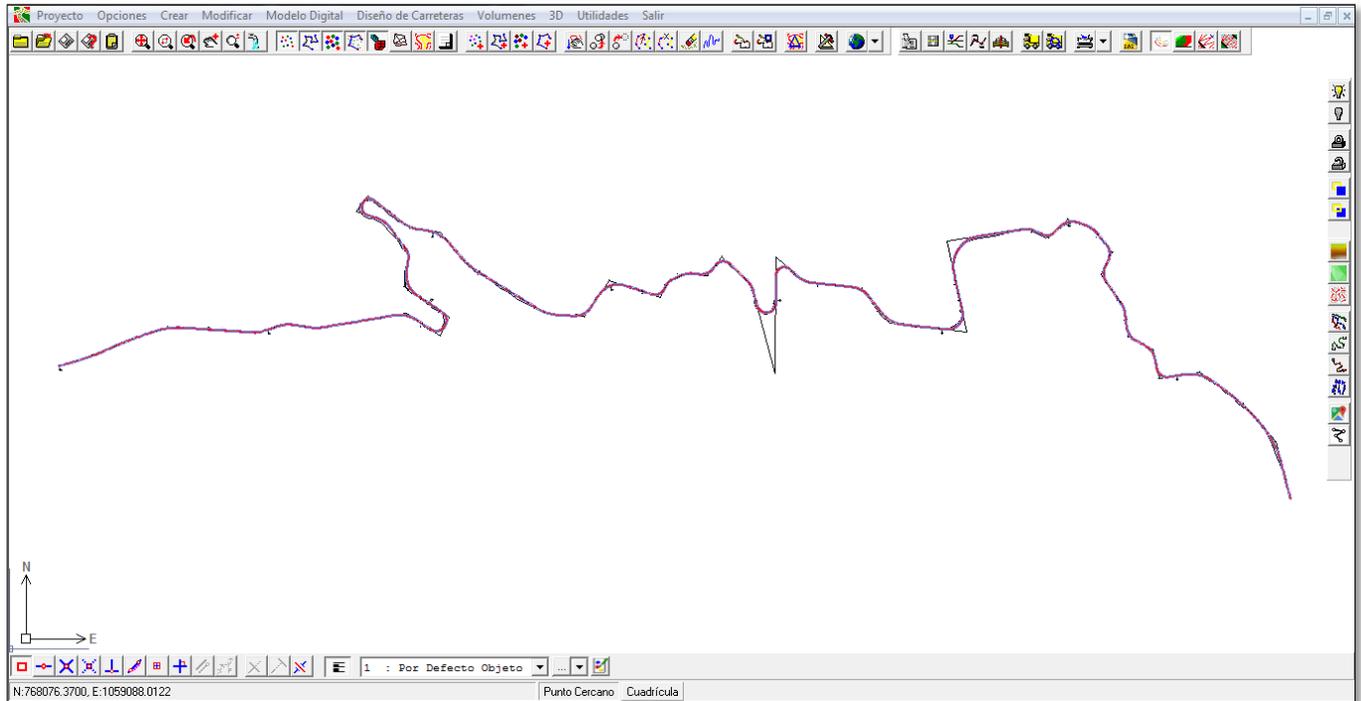
Primero se ingresaron las coordenadas dadas por el GPS en las que se puede visualizar claramente el trazado de la vía existente. Ver la figura 11.

Figura 11: Puntos GPS del recorrido



A continuación se realizó el diseño en planta ciñéndose al alineamiento lo más posible, dando como resultado 43 curvas horizontales las cuales se asumen de tipo circular. Ver figura 12.

Figura 12: Diseño en planta del tramo estudiado



La figura 13 muestra los parámetros de diseño adoptados.

Figura 13: Parámetros generales de diseño

PARAMETROS GENERALES DE DISEÑO VÍA [Polilínea: 2 Polilínea 2]

Especificaciones Diseño Geométrico: Colombia

Categoría de la Vía: 1B. Primaria de una calzada

Tipo de Terreno: M. Montañoso

Velocidad de Tramo Vtr (km/h): 60 >=60.0 y <=90.0

Vch = Vtr

Peralte Máximo (%): 8 Peralte Mínimo = Bombeo

Sección Transversal Típica Inicial: 1

Tipo Vehículo de Diseño: C3S2. Tractocamión de tres ejes coi

Velocidad Inicial Específica (km/h): 40 Forzar Velocidad Inicial a la Primera Curva

Ancho de Zona (m): 60.0

Velocidad Deseada (km/h): 100

Sentido del Tránsito: Doble Sentido

Secciones Transversales Típicas

4.2 ELABORACIÓN DE GRÁFICAS DE VELOCIDAD

Para cada curva se elaboró una hoja de cálculo en Excel en la que se organizó la información recopilada por el GPS correspondiente a abscisas y velocidades. Después se interpolaron los valores de abscisa y velocidad correspondiente al PC y PT con el fin de determinar la velocidad con que los sujetos entran y salen de la curva.

Posteriormente se calculó la distancia relativa del PC-PT de cada curva, donde el 0 (cero) corresponde al PC o principio de la curva y el 100 (cien) corresponde al PT o principio de la tangente siguiente; los valores negativos corresponden a la entretangencia inmediatamente anterior a la curva estudiada.

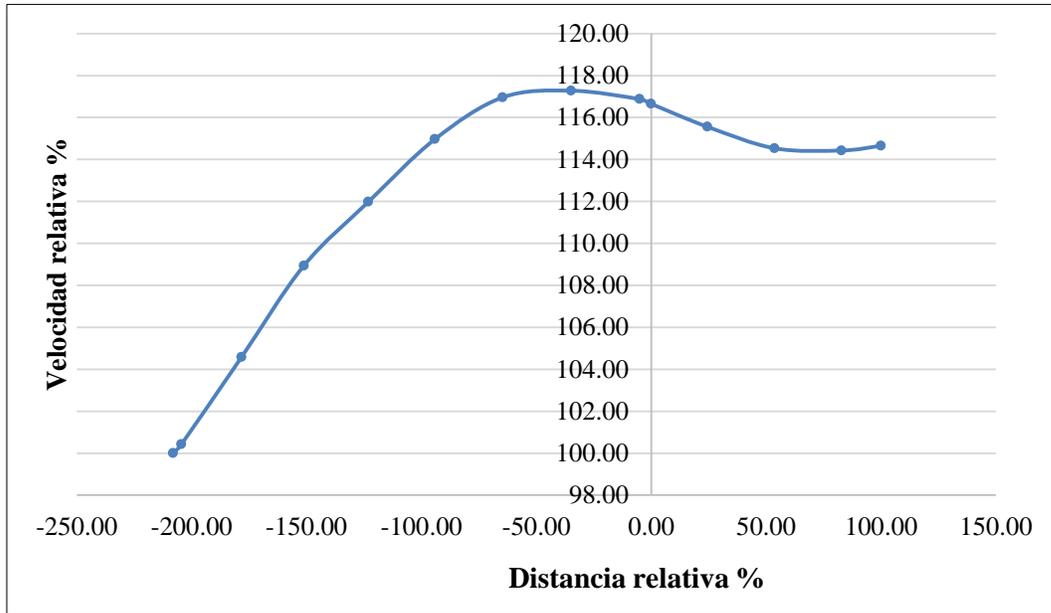
La figura 14 muestra la hoja de cálculo tipo que se usó para todas las curvas.

Figura 14: Hoja de cálculo tipo

CURVA #	PUNTO	ABSCISA	VELOCIDAD (km/h)	PENDIENTE (%)	ABSCISA (m)	Dist relativa al PC-PT (m)	VELOCIDAD (km/h)	VELOCIDAD RELATIVA (%)	INCREMENTO DE VEL (%)	CAMBIO DE VEL. EN LA CURVA (km/h)	VEL PROM (km/h)
25				-9.263	4611.533		48.914				55.653
	PT	4623.335	50.198		4623.335	-208.075	50.198	100.000			
Entretangencia					4625.329	-204.436	50.415	100.432			
					4639.622	-178.352	52.496	104.576			
					4654.509	-151.186	54.685	108.938			
					4669.911	-123.078	56.214	111.984			
					4685.734	-94.202	57.709	114.963			
					4701.903	-64.695	58.711	116.958			
					4718.234	-34.892	58.872	117.279			
					4734.560	-5.100	58.669	116.875			
26	PC	4737.354	58.555		4737.354	0.000	58.555	116.647			
					4750.765	24.473	58.008	115.557			
4766.806					53.748	57.492	114.530				
4782.769					82.879	57.441	114.428				
	PT	4792.151	57.552	4792.151	100.000	57.552	114.649	-1.999			
					4798.751		57.630				

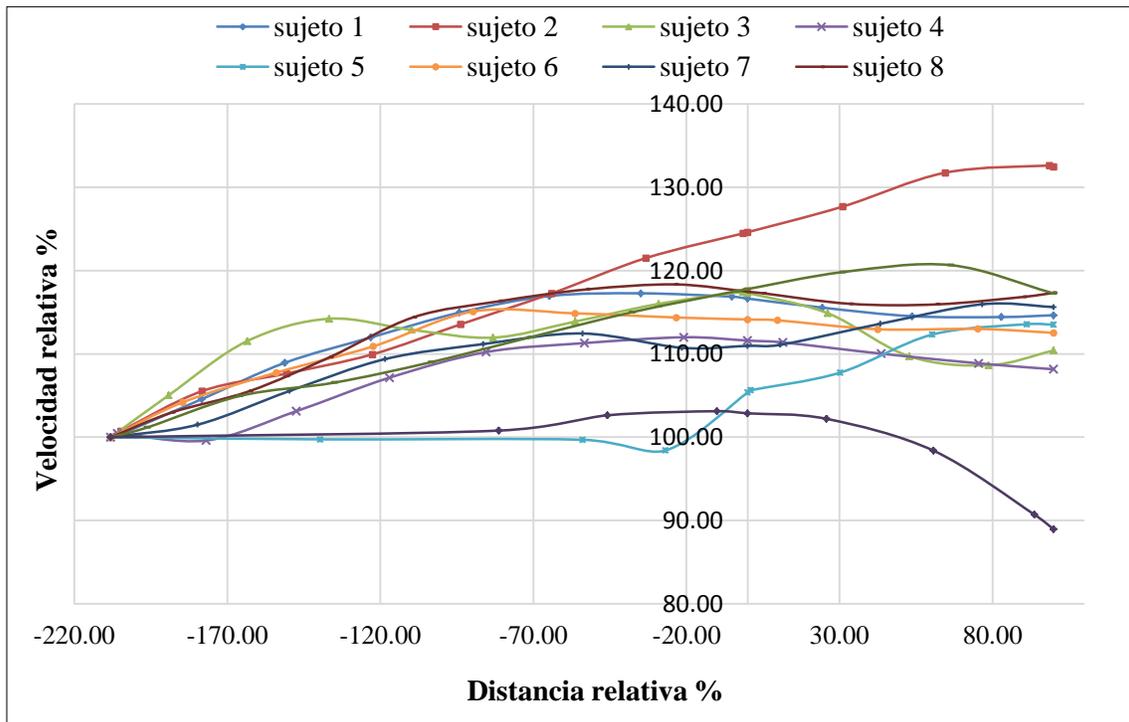
A modo de ejemplo la figura 15 muestra cómo un sujeto varía su velocidad cuando toma la curva 26.

Figura 15: Velocidad relativa vs distancia relativa del sujeto 1 en la curva 26



La figura 16 muestra el comportamiento de los 10 sujetos al tomar la curva 26.

Figura 16: Gráfica combinada de los 10 sujetos en la curva 26

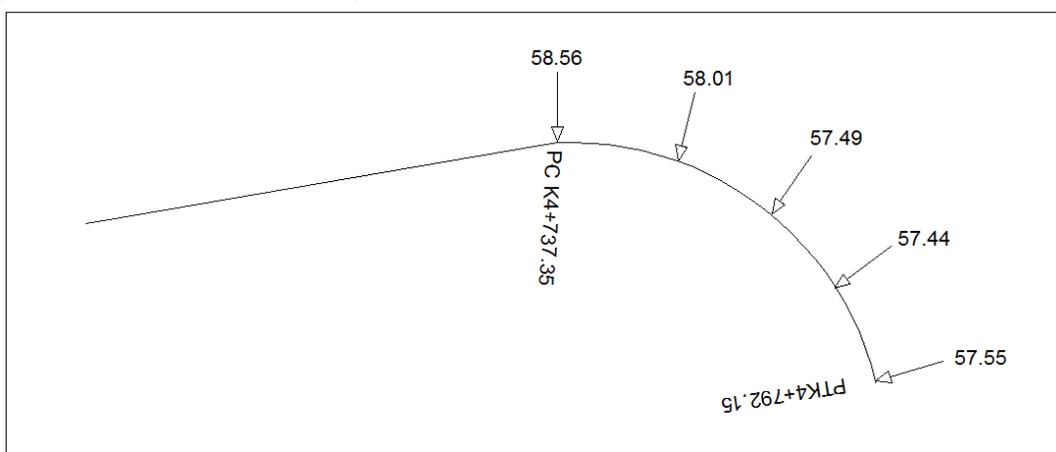


4.3 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN LAS CURVAS

Para calcular las velocidades de operación en cada curva se tomaron las velocidades medidas en cada punto de la trayectoria por cada segundo de recorrido y se calculó el percentil 85 (V_{85}), correspondiente a la velocidad de operación.

La figura 17 muestra los datos de velocidad en kilómetros por hora del sujeto 1 en la curva 26.

Figura 17: Velocidades del sujeto 1 en la curva 26



Con estos datos de velocidades se calculó el percentil 85 (P_{85}), este valor es el que se ha registrado en la tabla 8 como velocidad de operación del sujeto 1 en la curva 26.

En la tabla 7 se muestran velocidades del sujeto 1 en la curva 26 y el respectivo P_{85} .

Tabla 7: P_{85} del sujeto 1 en la curva 26

58.56	P_{85}
58.01	
57.49	
57.44	
57.55	
	58.23

Así se realizó para cada curva y cada sujeto el cálculo de la velocidad de operación, se asumió como la velocidad de operación de una curva el promedio del P_{85} de las velocidades de los 10 sujetos dentro de esa curva. El mismo ejercicio se efectuó tanto en el sentido del abscisado de la vía como en el sentido contrario

Los datos y promedios de las velocidades de operación de los 10 sujetos se resumen en las tablas 8 y 9.

Tabla 8: Velocidades de operación de las curvas sentido del abscisado (km/h)

Curva	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6	Sujeto 7	Sujeto 8	Sujeto 9	Sujeto 10	Promedio
4	62.92	71.92	65.94	76.58	62.79	65.91	70.46		62.27	82.13	68.99
5	58.64	69.45	63.61	71.76	65.11	65.91	65.79		53.88	75.89	65.56
6	63.57	73.94	65.27	72.51	68.74	72.62	66.18		78.22	86.11	71.91
7	61.54	65.04	63.12	66.50	62.19	67.44	68.61	65.10	71.24	72.00	66.28
8 y 9	48.01	51.97	52.18	52.59	41.31	50.76	48.42	49.97	52.15	55.93	50.33
10	48.80	60.74	53.93	59.55	54.74	59.73	64.39	57.04	65.51	67.85	59.23
11	52.00	61.09	55.53	58.97	48.05	53.09	61.31	52.09	61.74	68.25	57.21
12	57.41	64.19	62.84	61.89	57.29	65.17	69.70	60.32	56.98	68.48	62.43
13 y 14	50.56	52.01	51.04	52.52	49.62	50.68	57.96	50.39	50.51	40.50	50.58
15	62.30	73.56	62.04	75.49	66.10	66.76	73.37	62.00	67.51	75.75	68.49
16	62.38	73.73	56.83	75.57	71.17	66.89	71.94	54.53	71.38	76.09	68.05
17	61.84	73.31	61.73	75.77	70.02	68.16	71.81	52.90	77.88	78.40	69.18
18	63.45	77.86	69.85	84.40	65.23	55.80	68.29	59.89	81.51	90.72	71.70
19	58.23	66.96	62.92	65.11	57.82	65.62	63.72	62.91	70.61	65.71	63.96
20	63.38	69.81	67.20	67.97	65.01	67.08	70.80	59.06	72.04	74.92	67.73
21	51.27	58.63	48.76	57.11	42.96	50.76	58.55	49.81	56.94	62.47	53.73
22	50.97	59.36	48.02	54.77	45.40	58.67	57.79	46.24	62.10	64.69	54.80
23	55.52	61.16	50.12	60.78	68.19	60.54	64.70	54.19	67.63	67.73	61.06
24	55.51	52.87	37.36	56.26	49.60	56.36	64.17	52.00	60.05	67.80	55.20
25	50.47	48.69	45.49	54.32	53.95	56.50	57.27	48.17	56.92		52.42
26	58.23	67.46	54.22	63.83	61.23	65.07	66.33	56.47	69.54	70.43	63.28
27	48.14	53.38	50.18	53.69	52.98	53.45	49.94	51.34	48.86		51.33
28	51.23	58.98	51.93	54.41	76.49	50.76	59.96	40.50	60.05	63.03	56.73
29	60.94	74.03	60.47	68.96	77.05	59.51	62.95	57.02	76.67	76.07	67.36
30	62.77	68.17	68.50	71.19	68.35	59.35	67.18	69.08	76.75	68.72	68.01
31	60.69	69.56	66.54	73.68		54.35	72.81	62.15	78.96	78.30	68.56
32	59.39	62.35	64.07	62.60	46.80	65.28	57.53	65.52	61.44		60.55
33	62.52	67.68	62.84	66.85	53.14	73.57	61.83	75.95	73.98		66.48
34	57.39	64.47	64.64	53.26	69.84	67.39	57.89	60.59	64.30		62.20
35	45.28	52.30	46.99	46.52	52.60	48.88	44.44	52.87	56.42		49.59
36	56.19	64.77	53.64	58.78	60.30	64.88	54.77	63.75	69.50		60.73
37	61.81	66.58	60.65	63.45		66.74	69.72	64.29	69.92	69.30	65.83
38	52.95	65.25	54.10	56.34	56.67	60.41	60.68	71.15	60.84		59.82
39	50.57	63.98	50.02	55.76	53.45	58.56	52.09	61.84	65.26		56.84
40	44.78	66.44	59.43	63.53	63.16	70.03	59.78	69.43	67.91		62.72

Tabla 9: Velocidades de operación de las curvas sentido contrario al abscisado (km/h)

Curva	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6	Sujeto 7	Sujeto 8	Sujeto 9	Sujeto 10	Sujeto 11	Promedio
4	57.55	88.26	72.86	61.66	76.53	70.65	69.67	85.28	69.66	76.79	69.17	72.55
5	56.66	80.21	60.01	59.98	71.46	65.59	64.21	77.86		66.65	65.47	66.81
6	57.98	81.74	71.53	60.12	78.47	62.68	71.49	81.00	67.53	60.85	62.24	68.69
7	59.68	73.47	69.45	58.84	74.57	67.21	68.85	77.37	74.73	75.59	62.60	69.31
8 y 9	47.61	53.74	48.94	44.53	47.40	54.12	43.44	58.16	61.62	49.63	45.65	50.44
10	58.32	59.12	61.63	54.87	61.37	66.76	60.79	68.66	57.33	72.70	58.28	61.80
11	58.37	56.42	54.01	61.55	59.92	60.58	56.80	66.74	66.59	63.10	59.64	60.34
12	68.16	72.26	71.97	61.76	69.50	74.49	64.79	86.17	60.68	76.24		70.60
13 y 14	45.64	58.72	53.55	49.64	52.45	59.28	43.43	57.92	59.21	52.60	46.98	52.67
15	69.95	74.67	67.82	67.64	68.68	64.23	69.09	82.37	74.41	68.63	67.61	70.46
16	68.87	70.87	66.62	66.44	67.01	70.99	67.55	81.69	66.56	70.00	70.88	69.77
17	68.15	95.56	71.16	71.84	77.17	78.31	75.00	86.58	86.96	72.43	75.56	78.07
18	68.71	79.91	73.58	67.95	76.58	72.81	75.98	91.22	86.47	76.42	69.18	76.25
19	66.32	74.36	66.57	64.87	73.97	68.75	69.76	78.07	67.88	75.02	56.84	69.31
20	65.92	73.82	68.19	61.18	67.94	68.05	68.42	72.45	62.41	70.66	61.06	67.28
21	56.60	61.74	64.80	55.31	60.74	54.49	51.75	70.17	50.37	48.94	52.28	57.02
22	56.26	58.09	59.01	55.21	44.99	55.86	49.70	55.97	49.17	53.11	51.75	53.56
23	62.75	76.66	59.85	60.35	48.88	64.07	59.10	68.89	52.46	60.48	57.66	61.01
24	57.12	69.31	50.43	57.45	50.41	57.73	51.14	62.61	43.34	59.76	52.18	55.59
25	49.62	60.49	50.81	47.65	49.69	50.67	47.53	57.47	44.05	55.15	48.63	51.07
26	64.17	69.90	67.69	61.34	55.59	66.54	60.68	75.20	61.48	74.45	56.46	64.86
27	53.66	61.23	56.37	51.80	59.50	60.62	50.72	64.07	51.52	59.94	49.54	56.27
28	52.47	59.44	55.36	50.57	54.92	57.30	52.15	63.99	55.32	56.52	48.93	55.18
29	66.34	79.94	67.95	63.50	71.07	65.30	58.70	77.44	58.32	62.50	53.20	65.84
30	64.35	74.47	68.10	61.77	69.54	68.16	63.66	75.82	59.53	65.42	65.61	66.95
31	54.77	78.72	78.96	60.55	63.44	72.79	76.41	73.73	73.26	72.30	65.51	70.04
32	59.15	65.12	62.19	47.41	67.27	56.80	54.00	70.22	58.66	68.13	59.09	60.73
33	65.21	77.82	73.92	66.54	76.38	72.94	72.53	78.62	66.43	72.95	65.95	71.75
34	60.40	73.82	67.51	61.95	67.07	64.44	62.25	70.27	63.83	70.66	56.08	65.30
35	53.50	57.61	53.90	50.81	55.60	57.50	48.49	58.99	51.84	58.65	51.23	54.37
36	58.43	67.47	63.53	58.54	58.21	63.33	59.49	69.57	54.67	68.47	56.11	61.62
37	58.46	72.67	70.71	59.89	72.65	68.71	67.93	77.25	58.41	70.20	62.32	67.20
38	54.67	67.23	59.48	57.69	65.21	67.70	55.52	65.24	56.23	62.11	55.83	60.63
39	52.53	60.09	58.33	52.97	58.73	55.06	54.57	63.29	50.06	58.01	53.02	56.06
40	53.93	67.37	65.96	67.65	73.48	59.48	60.70	61.14	58.02			63.08

La curva 8-9 se toma como una sola ya que su entretangencia es pequeña (menor a 7 metros), sus radios son similares y además tienen el mismo sentido.

La curva 13-14 se toma como una ya que su entretangencia es pequeña (menor a 1 metro), sus radios son similares y además tienen el mismo sentido.

Se notifica que en las tablas 8 y 9 hay algunos espacios vacíos, correspondientes a aquellos datos cuyo valor se salía de la lógica, esto debido a que en el recorrido no se tenía flujo libres en esos instantes o que el receptor GPS perdiera señal.

4.4 CÁLCULO DE LAS VELOCIDADES DE OPERACIÓN EN LAS ENTRETANGENCIAS

La velocidad de operación en las entretangencias corresponde a la velocidad del P_{85} en el tramo recto anterior a la curva de análisis. Ese tramo está comprendido entre el punto de terminación PT de la curva anterior y el punto de comienzo PC de la curva de análisis.

Para calcular las velocidades de operación en cada entretangencia se tomaron los datos de velocidad de cada sujeto durante su trayectoria en la misma y se calculó el percentil 85 (V_{85}), correspondiente a la velocidad de operación. Cada fila corresponde a la entretangencia inmediatamente anterior a la curva; es decir la fila 4 corresponde a la entretangencias de las curvas 3 y 4 y así sucesivamente.

La velocidad de operación de las entretangencias se asume como el promedio de las velocidades de operación calculadas de los 10 sujetos, en cada tramo recto anterior a la curva.

Los datos y promedios de las velocidades de operación de los 10 sujetos se resumen en las tablas 10 y 11.

Tabla 10: Velocidad de operación de las entretangencias sentido del abscisado (km/h)

Recta	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6	Sujeto 7	Sujeto 8	Sujeto 9	Sujeto 10	V_{85}^{Tang}
4	63.97	71.88	67.58	78.18	71.07	65.93	73.17		69.69	86.79	72.03
5	61.75	68.37	64.97	72.41	62.74	64.12	67.49		51.66	79.97	65.94
6	57.51	70.82	63.76	72.41	68.82	64.67	65.41		65.46	77.96	67.43
7	68.68	77.03	68.01	85.76	78.45	86.04	78.24		87.75	92.48	78.74
8 y 9	56.11	63.90	64.87	64.17	61.59	65.83	67.81	64.52	67.27	64.63	64.07
10	56.97	59.20	55.19	64.04	52.74	62.75	64.29	57.39	67.66	69.16	60.94
11	48.17	61.77	55.59	58.38	53.66	55.42	64.28	53.21	70.23	65.90	58.66
12	58.42	64.76	60.31	64.24	55.56	62.70	69.11	59.53	62.70	67.76	62.51
13 y 14	56.42	56.62	62.66	59.85	58.66	60.13	66.73	59.71	51.49	52.74	58.50
15	62.10	71.02	59.42	71.20	67.48	67.64	75.20	61.74	66.33	70.79	67.29
16	62.73	73.58	60.44	75.65	67.56	66.66	71.57	57.28	68.42	75.98	67.99
17	60.23	71.46	55.55	72.58	73.57	65.61	70.06	36.82	73.94	76.22	65.61
18	68.03	80.35	69.65	84.40	82.10	70.22	80.86	63.71	84.11	89.74	77.32
19	62.74	73.87	69.68	78.27	68.67	59.73	68.82	63.56	78.61	79.58	70.35

Recta	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6	Sujeto 7	Sujeto 8	Sujeto 9	Sujeto 10	V85_{Tang}
20	61.91	67.45	64.62	64.34	62.78	67.97	65.60	59.09	72.69	68.52	65.50
21	59.60	67.07	65.48	67.77	65.06	63.22	69.25	58.04	73.87	73.63	66.30
22	49.64	60.40	45.90	52.85	42.97	51.29	55.97	43.37	54.56	55.77	51.27
23	56.69	62.61	51.59	60.68		61.54	62.99	52.99	65.39	66.32	60.09
24	51.58	52.69	41.28	58.14	72.50	56.06	63.38	53.23	59.20	66.07	57.41
25	55.05	40.70	35.45	54.09	45.00	54.95	55.33	51.50	51.87		49.33
26	58.71	61.75	54.25	63.78	53.79	65.56	63.88	56.68	66.64	70.78	61.58
27	57.72	63.92	54.15	61.04		62.91	65.83	57.89	65.25	53.01	60.19
28	53.69	57.73	53.86	59.29	49.95	55.15	60.09	44.55	55.27	58.01	54.76
29	54.06	64.65	55.21	59.67	77.92	54.59	60.81	44.55	61.05	66.17	59.87
30	63.70	79.42	72.06	74.42	67.10	65.03	69.08	80.53	79.75	77.75	72.89
31	57.60	70.47	65.72	67.90		53.89	60.67	64.66	75.51	69.18	65.07
32	66.93	70.81	66.25	71.19		52.48	75.93	61.95	77.08	77.92	68.95
33	61.58	67.89	54.43	66.99		63.16	70.32	57.10	71.81	71.33	64.96
34	66.95	66.47	65.19	69.34		65.52	78.97	66.87	80.30	79.38	71.00
35	51.96	55.99	54.67	29.47		55.61	58.69	52.20	49.92	50.98	51.05
36	51.25	56.68	43.97	50.20		52.77	51.64	45.94	55.15	64.31	52.43
37	58.13	64.43	55.68	58.71		63.20	66.04	58.06	66.31	69.67	62.25
38	61.06	68.08	60.26	62.91		63.43	67.52	62.92	73.04	62.61	64.65
39	52.03	59.73	52.87	57.22		55.83	56.90	55.90	54.84	57.57	55.88
40	35.40	65.87	59.61	62.20		61.48	68.39	57.44	65.39	66.26	60.23

Tabla 11: Velocidades de operación de las entretangencias en sentido contrario al abscisado (km/h)

Recta	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6	Sujeto 7	Sujeto 8	Sujeto 9	Sujeto 10	Sujeto 11	V85_{Tang}
4	56.46	84.82	67.29	60.50	72.54	67.03	66.09	81.77	77.84	75.35	65.25	70.45
5	57.70	81.21	63.42	58.87	71.26	60.95	66.71	75.79	72.57	56.61	63.14	66.20
6	64.75	91.28	84.03	67.48	88.91	78.22	79.40	88.51	86.58	77.77	70.39	79.75
7	54.91	64.02	63.43	57.95	62.55	59.14	59.25	66.08	52.41	56.94	55.57	59.30
8 y 9	64.04	70.17	67.79	60.96	68.77	67.24	63.04	70.02	69.00	76.49	62.24	67.25
10	56.73	43.03	64.06	53.28	59.82	59.62	58.75	65.59	58.86	72.16	58.96	59.17
11	72.34	75.55	64.37	74.42	70.04	75.96	70.30	85.06	69.09	78.61	66.48	72.93
12	58.76	64.35	62.20	56.32	64.71	65.58	50.97	74.09	45.11	62.87	54.44	59.95
13 y 14	73.68	77.52	67.35	70.74	71.63	67.56	70.20	80.96	73.72	69.60	67.57	71.87
15	69.40	66.69	67.60	66.88	71.12	64.92	67.47	80.34	70.25	66.71	69.84	69.20
16	66.82	82.09	71.74	71.54	73.83	75.46	70.81	80.61	69.84	73.73	76.02	73.86

Recta	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Sujeto 5	Sujeto 6	Sujeto 7	Sujeto 8	Sujeto 9	Sujeto 10	Sujeto 11	V_{85Tang}
17	73.90	94.51	75.54	68.61	81.48	83.34	89.88	96.45	98.99	78.68	77.84	83.56
18	66.73	75.08	66.73	64.68	74.70	69.23	69.43	79.07	68.09	75.27	55.82	69.53
19	68.65	76.15	67.93	63.37	69.04	67.51	70.37	70.69	69.34	75.61	60.80	69.04
20	61.96	77.81	68.25	64.92	74.85	65.08	72.28	76.68	62.32	54.36	54.53	66.64
21	47.38	50.91	56.09	51.10	43.85	47.05	44.15	51.75	43.71	50.57	45.12	48.34
22	63.76	74.85	64.74	62.00	48.05	63.26	62.18	64.58	56.43	57.83	59.44	61.56
23	57.01	70.60	47.36	56.94	52.05	61.30	52.44	66.55	48.24	59.16	53.53	56.84
24	52.04	58.04	49.88	49.77	46.02	50.39	51.29	59.77	46.17	55.44	47.99	51.53
25	65.14	70.97	69.02	63.41	53.17	69.32	62.67	74.22	64.00	78.32	53.82	65.82
26	65.36	67.03	64.75	59.85	58.08	66.81	58.99	69.57	61.92	70.69	53.33	63.31
27	62.57	70.88	66.54	59.52	58.68	68.50	60.84	70.54	64.35	62.05	55.45	63.63
28	55.22	62.36	63.36	55.61	55.26	57.28	55.80	65.41	50.76	59.51	45.33	56.90
29	68.13	78.17	71.40	64.29	74.15	68.90	61.75	77.91	62.28	67.67	65.91	69.14
30	57.95	70.28	67.76	60.54	64.18	68.76	65.83	72.28	58.67	66.13	61.49	64.90
31	69.28	85.36	81.34	57.97	76.99	78.82	78.76	85.95	76.66	80.23	69.80	76.47
32	65.50	83.81	76.59	49.59	76.95	77.30	76.53	81.09	80.16	83.69	69.91	74.65
33	66.98	83.63	76.75	72.30	77.45	70.70	82.22	81.32	75.78	87.26	64.73	76.28
34	55.04	64.97	54.95	58.48	57.59	59.77	53.81	61.99	53.63	63.27	50.29	57.62
35	57.02	62.50	55.65	53.80	57.45	62.43	54.94	64.76	57.45	61.57	55.28	58.44
36	58.13	69.26	67.95	59.37	66.14	64.72	65.99	75.35	58.55	69.28	60.62	65.03
37	57.25	71.42	65.61	61.17	68.32	70.22	65.82	73.19	59.65	66.94	60.41	65.45
38	53.96	61.89	58.77	53.63	57.48	55.47	53.34	58.71	49.39	57.11	50.26	55.45
39	55.17	69.58	67.49	68.50	74.73	64.56	62.54	67.47	53.26	68.17	62.78	64.93
40	54.57	67.89		66.09	70.88	58.77	55.37	62.43	64.35	63.82	57.04	62.12

Las tablas 10 y 11 describen la velocidad de operación de cada sujeto en el tramo recto antes de la curva de análisis, tanto en el sentido del abscisado como en el sentido contrario. Para cada curva se tomó el P₈₅ de las velocidades de los 10 sujetos y se calculó el promedio de éstas. La velocidad de operación se identifica en las tablas como V_{85Tang}.

4.5 CÁLCULO DE VELOCIDADES ESPECÍFICAS INFERIDAS

La velocidad específica inferida de cada curva se calcula en función del radio y del peralte máximo que permita obtener la mayor velocidad, de acuerdo con la tabla 12 del manual de diseño geométrico de carreteras.

Tabla 12: Radio (R_c) en función de la velocidad específica (V_{ch}) y peralte (e) para carreteras primarias y secundarias

e (%)	$V_{CH} = 40$ km/h R (m)	$V_{CH} = 50$ km/h R (m)	$V_{CH} = 60$ km/h R (m)	$V_{CH} = 70$ km/h R (m)	$V_{CH} = 80$ km/h R (m)	$V_{CH} = 90$ km/h R (m)	$V_{CH} = 100$ km/h R (m)	$V_{CH} = 110$ km/h R (m)	$V_{CH} = 120$ km/h R (m)	$V_{CH} = 130$ km/h R (m)
1,5	784	1090	1490	1970	2440	2970	3630	4180	4900	5360
2,0	571	791	1090	1450	1790	2190	2680	3090	3640	4000
2,2	512	711	976	1300	1620	1980	2420	2790	3290	3620
2,4	463	644	885	1190	1470	1800	2200	2550	3010	3310
2,6	421	587	808	1080	1350	1650	2020	2340	2760	3050
2,8	385	539	742	992	1240	1520	1860	2160	2550	2830
3,0	354	496	684	916	1150	1410	1730	2000	2370	2630
3,2	326	458	633	849	1060	1310	1610	1870	2220	2460
3,4	302	425	588	790	988	1220	1500	1740	2080	2310
3,6	279	395	548	738	924	1140	1410	1640	1950	2180
3,8	259	368	512	690	866	1070	1320	1540	1840	2060
4,0	241	344	479	648	813	1010	1240	1450	1740	1950
4,2	224	321	449	608	766	948	1180	1380	1650	1850
4,4	208	301	421	573	722	895	1110	1300	1570	1760
4,6	192	281	395	540	682	847	1050	1240	1490	1680
4,8	178	263	371	509	645	803	996	1180	1420	1610
5,0	163	246	349	480	611	762	947	1120	1360	1540
5,2	148	229	328	454	579	724	901	1070	1300	1480
5,4	136	213	307	429	549	689	859	1020	1250	1420
5,6	125	198	288	405	521	656	819	975	1200	1360
5,8	115	185	270	382	494	625	781	933	1150	1310
6,0	106	172	253	360	469	595	746	894	1100	1260
6,2	98	161	238	340	445	567	713	857	1060	1220
6,4	91	151	224	322	422	540	681	823	1020	1180
6,6	85	141	210	304	400	514	651	789	982	1140
6,8	79	132	198	287	379	489	620	757	948	1100
7,0	73	123	185	270	358	464	591	724	914	1070
7,2	68	115	174	254	338	440	561	691	879	1040
7,4	62	107	162	237	318	415	531	657	842	998
7,6	57	99	150	221	296	389	499	621	803	962
7,8	52	90	137	202	273	359	462	579	757	919
8,0	41	73	113	168	229	304	394	501	667	832

Los valores de velocidad específica inferida se muestran en la tabla 13, la cual contiene el radio de cada curva y el peralte asumido para obtener la mayor velocidad pero sin exceder la velocidad de diseño de 60 km/h.

Tabla 13: Velocidad específica inferida para las curvas del tramo estudiado

PI #	Delta (g,m,s,ID)	Radio entrada (m)	Peralte (e) (%)	V_{CH} Inferida (km/h)	V_{CH} diseño (60 km/h)
4	21,28,58 I	98	7.8	50	50
5	26,36,29 D	124	7.9	60	60
6	18,25,35 I	242	7.3	70	60
7	43,0,1 D	137	7.8	60	60
8	97,44,23 I	47	8	40	40

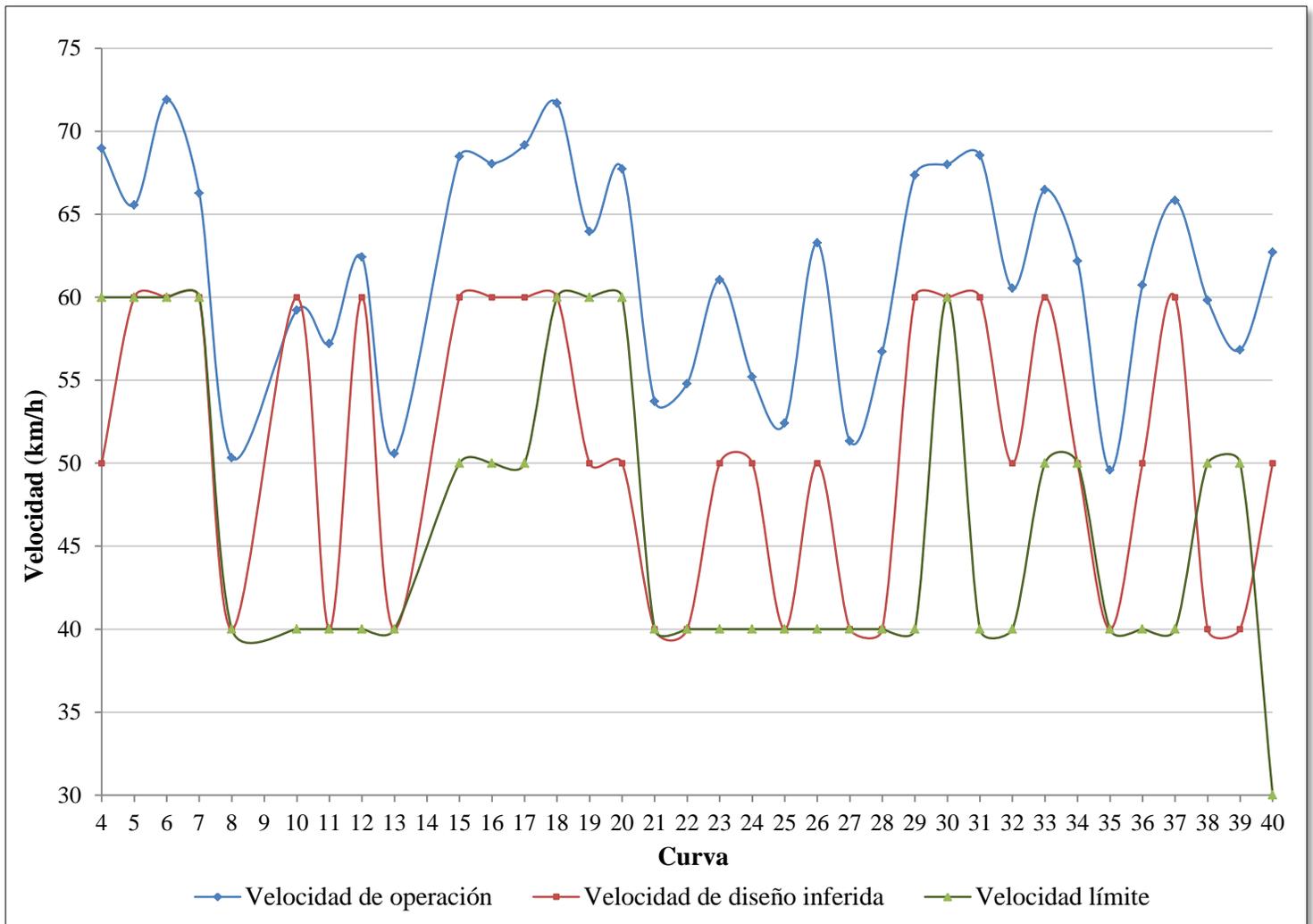
PI #	Delta (g,m,s,ID)	Radio entrada (m)	Peralte (e) (%)	V_{CH} Inferida (km/h)	V_{CH} diseño (60 km/h)
10	64,48,4 D	115	8	60	60
11	44,43,16 I	67	7.2	40	40
12	35,19,35 I	118	8	60	60
13	107,19,59 D	39	8	40	40
15	30,46,5 I	194	7.9	70	60
16	42,27,30 D	170	8	70	60
17	18,23,25 I	367	7.1	80	60
18	28,13,13 I	214	7.7	70	60
19	59,25,57 I	95	7.7	50	50
20	74,14,25 D	102	7.5	50	50
21	82,7,50 I	52	7.8	40	40
22	41,39,46 D	53	7.8	40	40
23	30,39,53 D	81	7.9	50	50
24	60,11,48 I	70	8	50	50
25	95,38,29 D	43	8	40	40
26	31,5,8 D	101	7.5	50	50
27	164,32,19 I	44	8	40	40
28	131,45,39 D	38	8	40	40
29	36,0,38 I	122	7.9	60	60
30	46,0,50 D	110	8	60	60
31	45,59,12 I	159	7.5	60	60
32	108,27,50 I	70	8	50	50
33	93,25,17 D	141	7.7	60	60
34	33,22,55 D	90	7.8	50	50
35	68,26,54 I	45	8	40	40
36	62,55,33 D	78	8	50	50
37	32,21,43 D	143	7.7	60	60
38	65,12,47 D	68	7.2	40	40
39	61,5,4 I	68	7.2	40	40
40	27,42,37 D	109	7.4	50	50

La velocidad específica inferida es igual para los dos sentidos.

4.6 RELACIÓN GRÁFICA ENTRE VELOCIDAD DE OPERACIÓN, VELOCIDAD LÍMITE EXISTENTE Y VELOCIDAD DE DISEÑO INFERIDA

El objetivo principal de la investigación es establecer la relación entre las velocidades de diseño, operación y las señales verticales existentes; la figura 18 presenta gráficamente la velocidad en cada curva, mediante un perfil de velocidades.

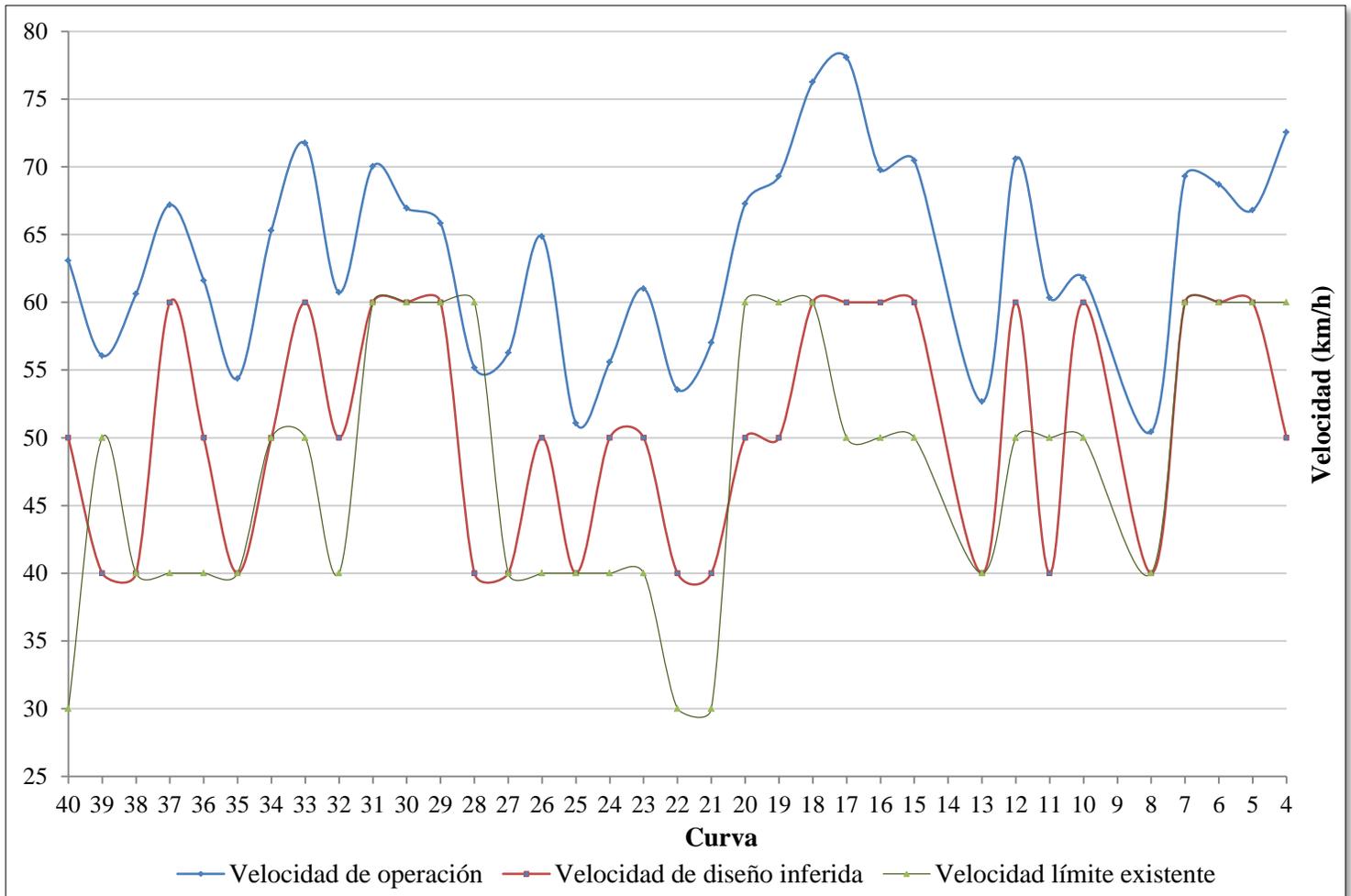
Figura 18: Velocidad de operación, velocidad de diseño inferida y velocidades límites en sentido del abscisado



La figura 18 muestra el comportamiento de velocidades en las curvas del tramo estudiado, desde la curva 4 (K0+934) hasta la curva 40 (K7+524). La velocidad de operación siempre es mayor que la velocidad límite existente, e incluso supera siempre la velocidad de diseño inferida, exceptuando la curva 10 (K2+068), en la cual la velocidad

de operación es superada por la velocidad de diseño inferida, aunque la diferencia es menor a 5 km/h. La velocidad de operación más alta corresponde a la curva 6 (K1+190), de 72 km/h, mientras que la velocidad de operación más baja es de 50 km/h, en la curva 35 (K6+863).

Figura 19: Velocidad de operación, velocidad de diseño inferida y velocidad límite existente, en sentido contrario al abscisado



En la figura 19 se observa que la velocidad de operación siempre es mayor que la velocidad específica inferida, e incluso supera la velocidad límite existente, exceptuando la curva 28 (K5+205), en la cual existe una diferencia de 5 km/h.

Haciendo la comparación del comportamiento de la deceleración de los sujetos en el sentido del abscisado y en el sentido contrario se realizan las siguientes observaciones:

- La velocidad de operación supera en más de 10 km/h la velocidad específica inferida de cada curva de acuerdo a la tabla 12 del manual de diseño geométrico del 2008.
- La velocidad de operación supera entre 10 y 20 km/h a la velocidad límite existente.

Los perfiles de las velocidades de operación, específicas y límites existentes de todo el recorrido en ambos sentidos son más o menos paralelos. Se presenta incremento de velocidad al inicio de ciertas curvas, y disminución de velocidad al aproximarse a otras curvas.

Teniendo en cuenta que el cambio de velocidad de 10 km/h en aceleración o deceleración para llegar a la siguiente curva es aceptado en el manual de diseño geométrico, la diferencia de 20 km/h entre curvas se considera un cambio brusco en la velocidad.

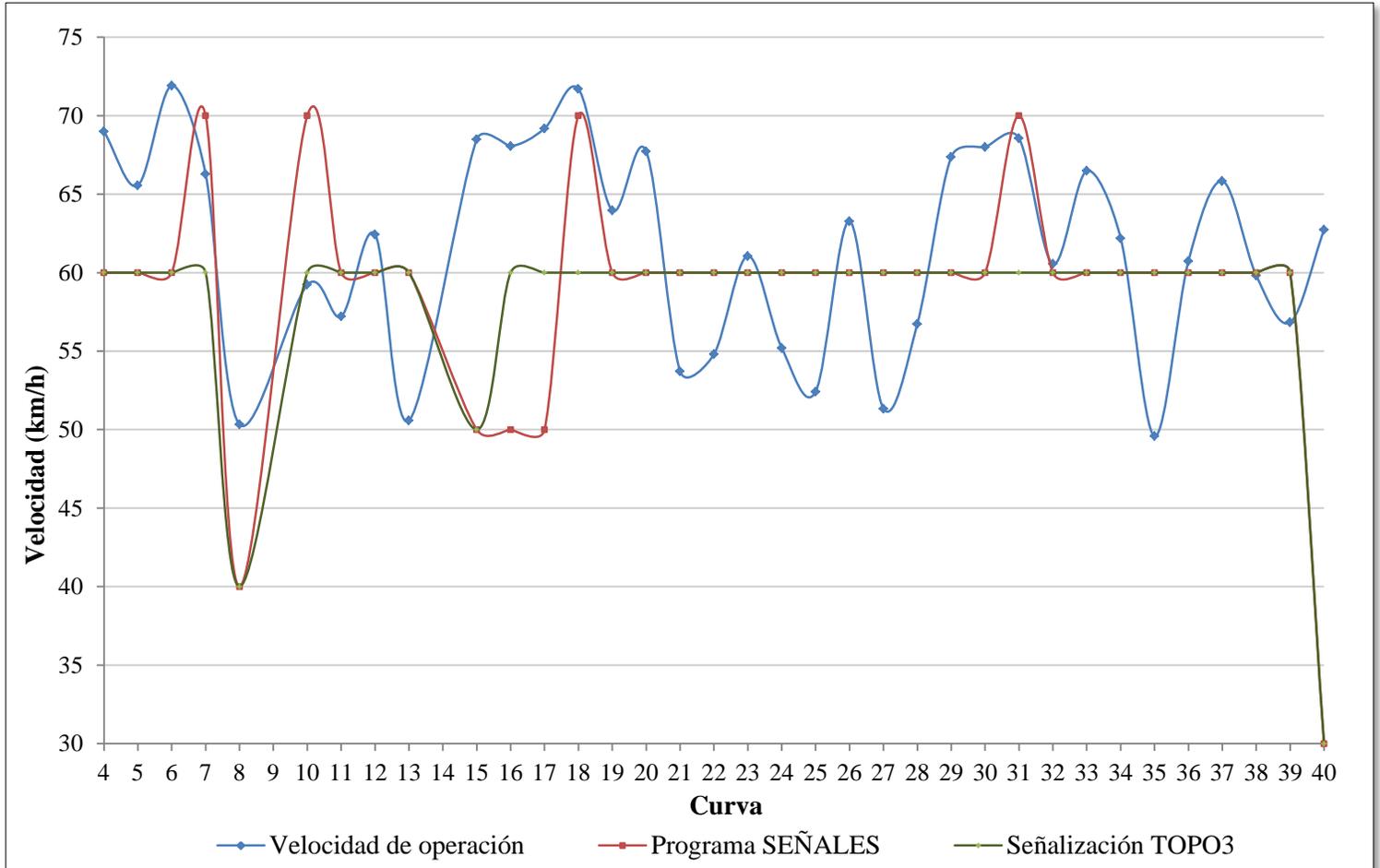
En las curvas 8, 13, 22, 28 y 35 se presentó cambio de velocidad de 20 km/h o más.

Las velocidades límites existentes tienden a estar por debajo de las velocidades de diseño (específicas) y de operación, es decir que el diseñador optó por una circulación más segura pero menos eficiente. Por otro lado las velocidades de operación, que son las más altas, reflejan que los usuarios no acatan la señalización reglamentaria, pero también que la operación se puede realizar a velocidades mayores de las recomendadas en el diseño.

4.7 RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE OPERACIÓN, SEÑALIZACIÓN DE TOPO3 Y PROGRAMA SEÑALES

A continuación se muestra la relación entre la velocidad de operación, la señalización de velocidades del programa TOPO3 y la del programa SEÑALES (incluido en TOPO3). El programa de señalización de TOPO3 se basa en el manual de diseño geométrico del 2008, que utiliza los criterios ahí estipulados para la creación del diseño en planta, por otro lado el programa SEÑALES se basa en el método para establecer límites de velocidad en carreteras colombianas del 2010.

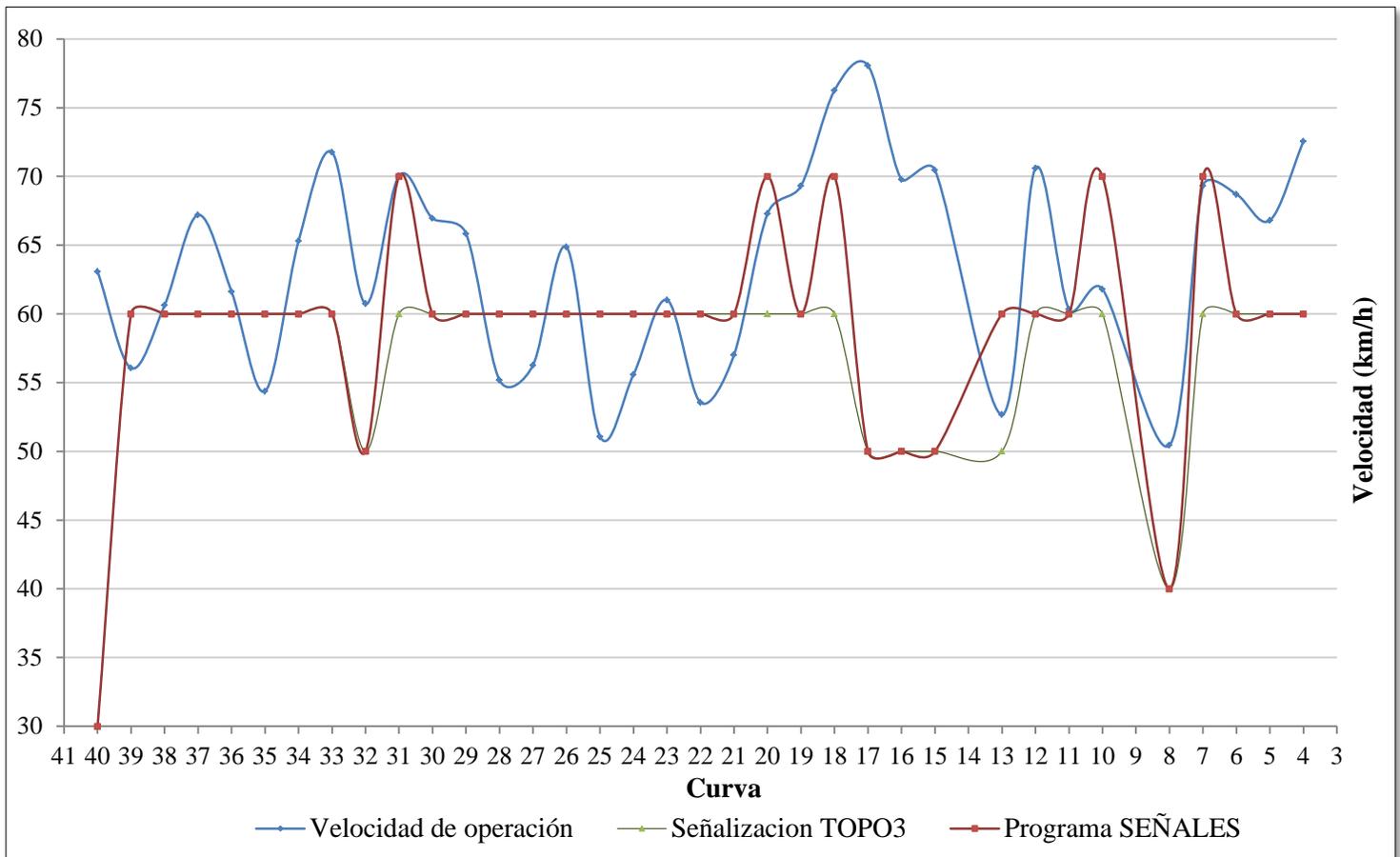
Figura 20: Relación entre velocidad de operación, señalización de TOPO3 y programa SEÑALES en sentido del abscisado



En la figura 20 se observa similitud entre las tres velocidades analizadas; se puede ver que la señalización de TOPO3 en la mayor parte del tramo mantiene una velocidad de 60 km/h, solo en los sitios especiales se nota un cambio de esta velocidad, mientras que la señalización con el programa SEÑALES en casi todo el tramo sigue la misma tendencia que la velocidad de operación.

En la curva 40 (K7+524), en la cual hay una zona escolar (velocidad límite recomendado 30 km/h), se observa que los sujetos hacen caso omiso a esta señal ya que conducen a velocidades más altas (alrededor de 60 km/h).

Figura 21: Relación entre velocidad de operación, señalización de TOPO3 y programa SEÑALES en sentido contrario al abscisado



En la figura 21 se observa un comportamiento similar al de la figura 20, es decir que la velocidad límite propuesta por el programa SEÑALES se asemeja más a la velocidad de operación. Se puede resaltar lo ocurrido en las curvas 15 (K2+832), 16 (K2+961) y 17 (K3+169), donde la diferencia de velocidades es de 20 km/h por encima de ambos programas de señalización, esto es debido a la zona urbana presente entre dichas abscisas (K2+832 a K3+169) pues la velocidad límite recomendada es de 50 km/h pero los sujetos hacen caso omiso y conducen a velocidades superiores.

Haciendo la comparación de los resultados de los programas de señalización tanto en sentido del abscisado como en sentido contrario se realizan las siguientes observaciones:

- Las velocidades resultado del programa TOPO3 tienen un comportamiento conservador en comparación al resultado del programa SEÑALES, ya que en casi todo el recorrido la velocidad recomendada es de 60 km/h.

- Ambos programas arrojan velocidades que en ciertos puntos superan la velocidad de operación; esto permite límites de velocidad mayores a las de los usuarios lo que genera puntos vulnerables que deben evitarse.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD DE OPERACIÓN, VELOCIDAD DE DISEÑO Y VELOCIDAD LÍMITE.

Como se observó en las figuras donde se relacionan las velocidades de operación con las velocidades límites existentes y de diseño (figuras 18 y 19) se evidencia que la velocidad de operación siempre es mayor que la velocidad límite existente, pero no siempre mayor que la velocidad de diseño.

En base a lo analizado en las gráficas antes mencionadas se determina que la mayoría de sujetos no conducen a la velocidad límite establecida, pues en algunos casos la diferencia de velocidades es bastante alta. Se menciona especialmente la zona escolar donde el límite existente es de 30 km/h y la velocidad promedio de los sujetos fue de 62.72 km/h.

La señalización existente lleva a los usuarios a conducir de forma segura pero poco eficiente, por lo que se pueden aumentar los límites de velocidad en varios puntos, por ejemplo en la curva 16 (K2+961) a la cual se le puede aumentar en 10 km/h más la velocidad límite, incluso en las zonas urbanas las cuales tienen un índice bajo de peatones se podría aumentar la velocidad límite, es decir pasar de 40 km/h a 50 km/h. Estas recomendaciones surgen al analizar las velocidades de operación de los sujetos, pues la mayoría condujo por lo menos 10 km/h por encima de dichos límites sin problema alguno, es decir en forma segura y cómoda.

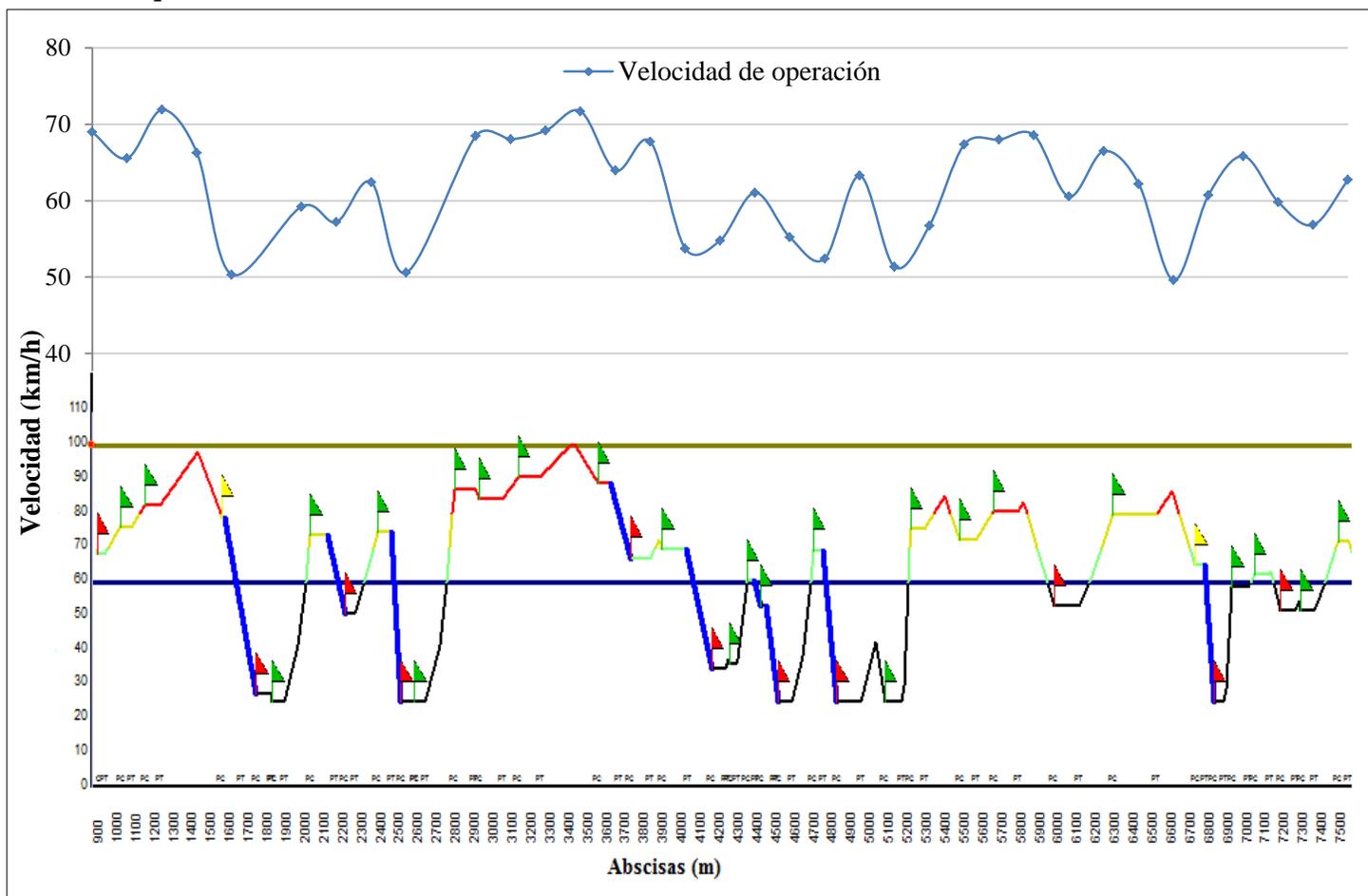
En cuanto a las figuras 20 y 21, que relacionan velocidad de operación, velocidad límite dada por el programa TOPO3 y velocidad límite establecida con el programa SEÑALES, se puede observar que estas tres velocidades presentan menos diferencia entre ellas, es decir que ambas señalizaciones funcionarían mejor que la existente. Se debe tener en cuenta que las velocidades límite no superen la velocidad de diseño inferida para no generar discordancia entre las velocidades.

Como se mencionó antes, en la mayoría de casos la velocidad de operación es mayor que la velocidad de diseño, lo que no es conveniente; lo ideal es que la diferencia entre velocidades no supere 8 km/h (± 5 mph) (Donnell et al., 2009).

5.2 PERFIL DE VELOCIDADES EN SENTIDO DEL ABCISADO

A continuación se presenta el perfil de velocidades emitido por el programa TOPO3 correspondiente a la geometría de la vía, relacionado con la velocidad de operación en las abscisas del tramo.

Figura 22: Perfil de velocidades en sentido del abscisado y relación con velocidad de operación

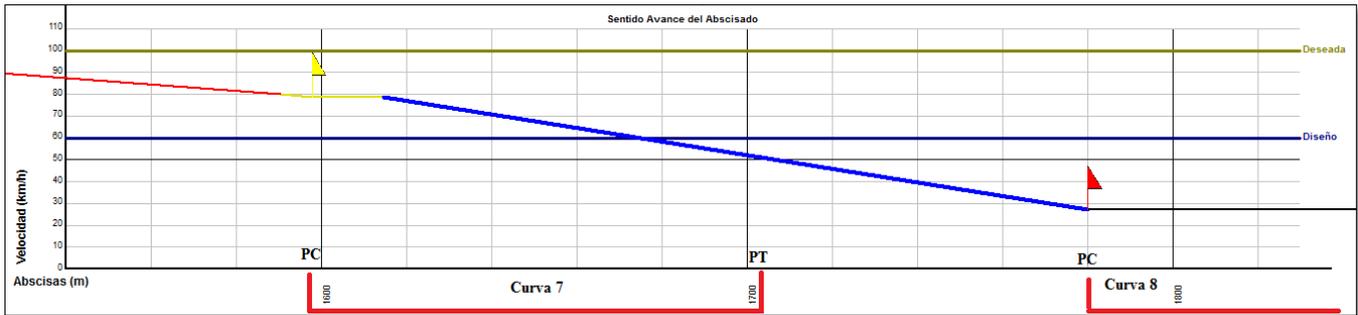


En la figura 22 podemos observar la relación entre la velocidad de operación y el perfil de velocidades en sentido del abscisado, en el cual se muestran las deceleraciones forzadas que corresponden a situaciones desfavorables, las cuales se resaltan con las líneas azules y que terminan en una bandera roja. Este perfil de velocidades es proporcionado por el programa TOPO3, que tiene en cuenta el diseño realizado con dicho programa.

Esta relación muestra que la velocidad de operación de los conductores tiene una tendencia similar al perfil de velocidades obtenido del programa TOPO3.

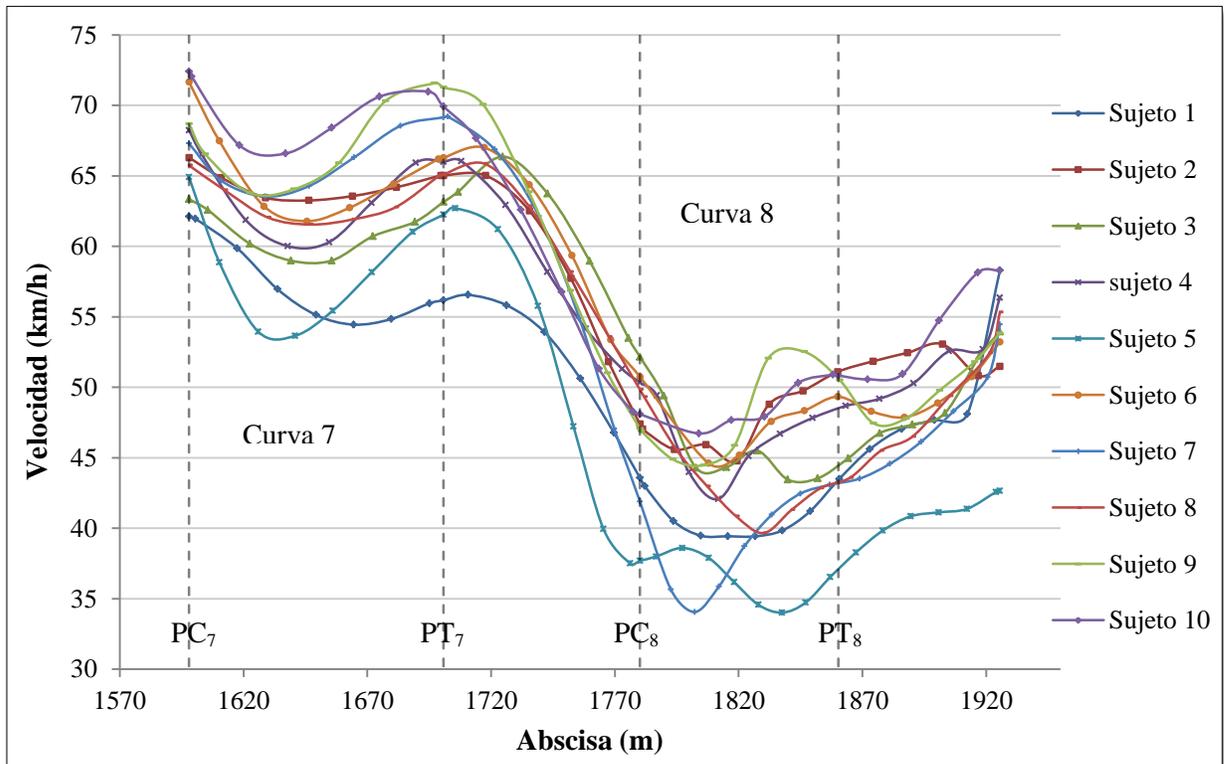
A continuación se analiza el comportamiento real de los conductores al tomar una curva. Se observará si este comportamiento concuerda con el perfil de velocidades obtenido, qué tan similares son los cambios de velocidad, y la tendencia a decelerar.

Figura 23: Deceleración forzada para tomar la curva 8



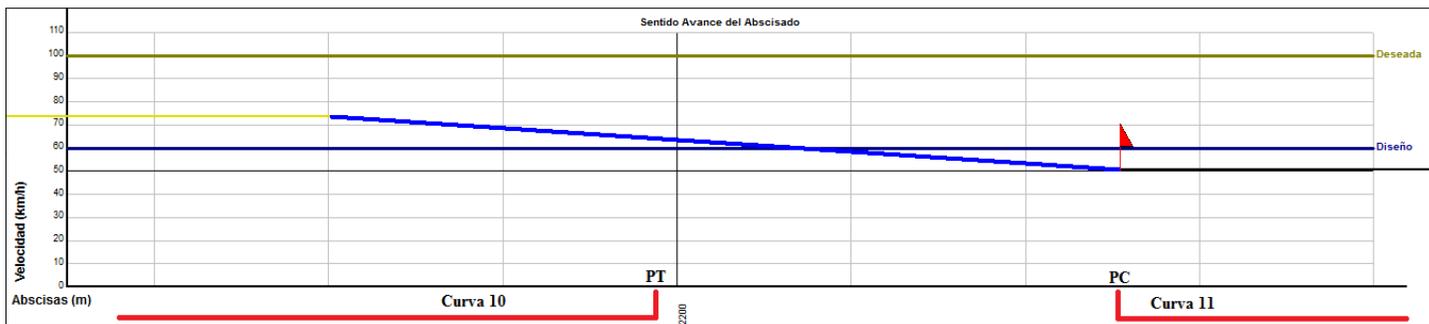
En la figura 23 se observa el cambio de velocidad de 80 km/h a 30 km/h para tomar la curva 8; la deceleración empieza durante el recorrido de la curva 7 y se completa en la recta entre las curvas 7 y 8. En la siguiente figura se puede apreciar cómo los sujetos deceleran para entrar a la curva 8.

Figura 24: Velocidad de los sujetos entre la curva 7 y la curva 8



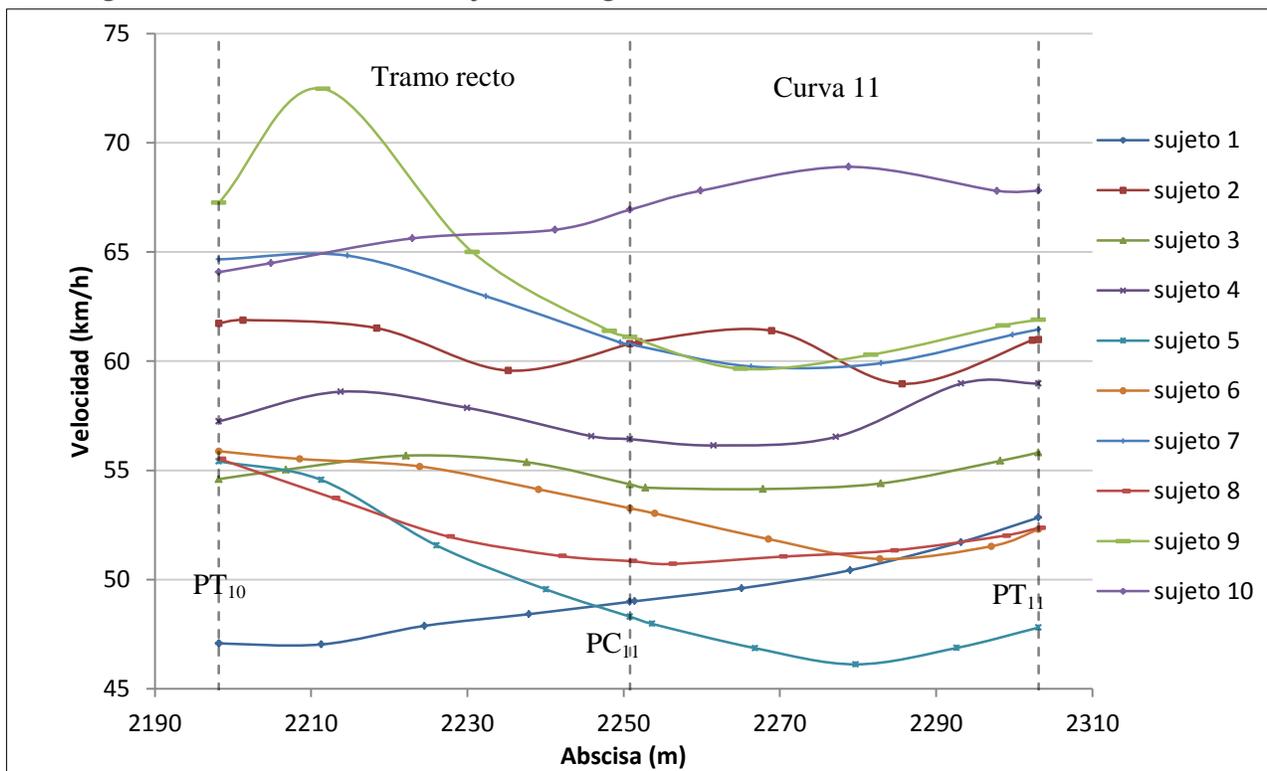
En la figura 24 se aprecia la reducción de velocidad entre la curva 7 (K1+597) y la curva 8 (K1+780).

Figura 25: Deceleración forzada para tomar la curva 11



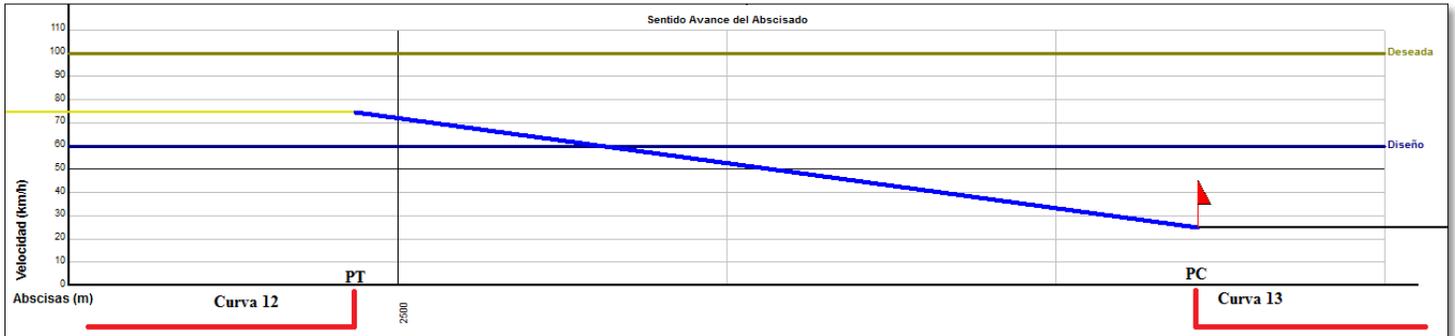
En la figura 25 se aprecia la condición deficiente de deceleración que se debe realizar para tomar la curva 11, donde se debe reducir la velocidad de 70 a 50 km/h en menos de 100 m.

Figura 26: Velocidad de los sujetos al ingresar a la curva 11



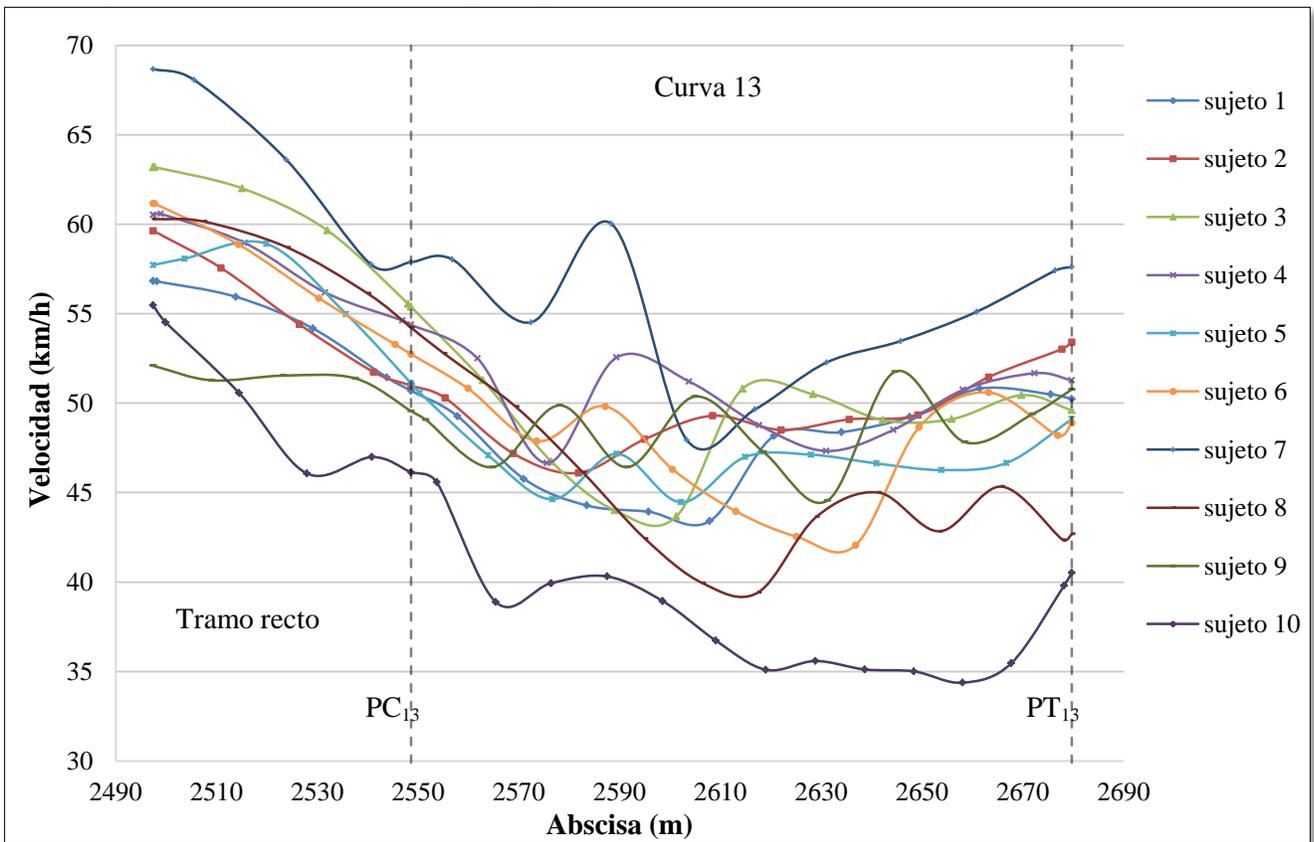
En la figura 26 se aprecia la reducción de velocidad de la mayoría de los sujetos entre la curva 10 (K2+068) y la curva 11 (K2+250).

Figura 27: Deceleración forzada para tomar la curva 13



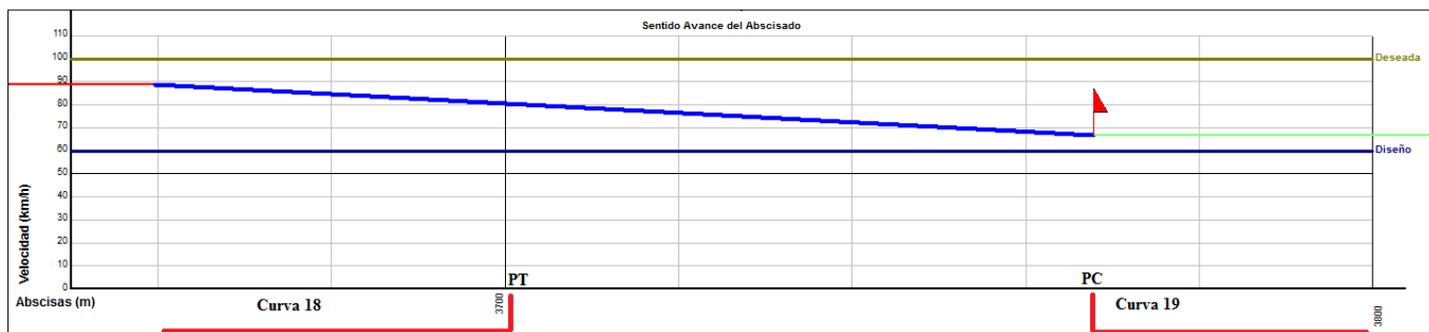
En la figura 27 se aprecia la deceleración que se realiza antes de la curva 13, pasando de velocidades próximas a los 70 km/h a 30 km/h en aproximadamente 50 metros.

Figura 28: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 13



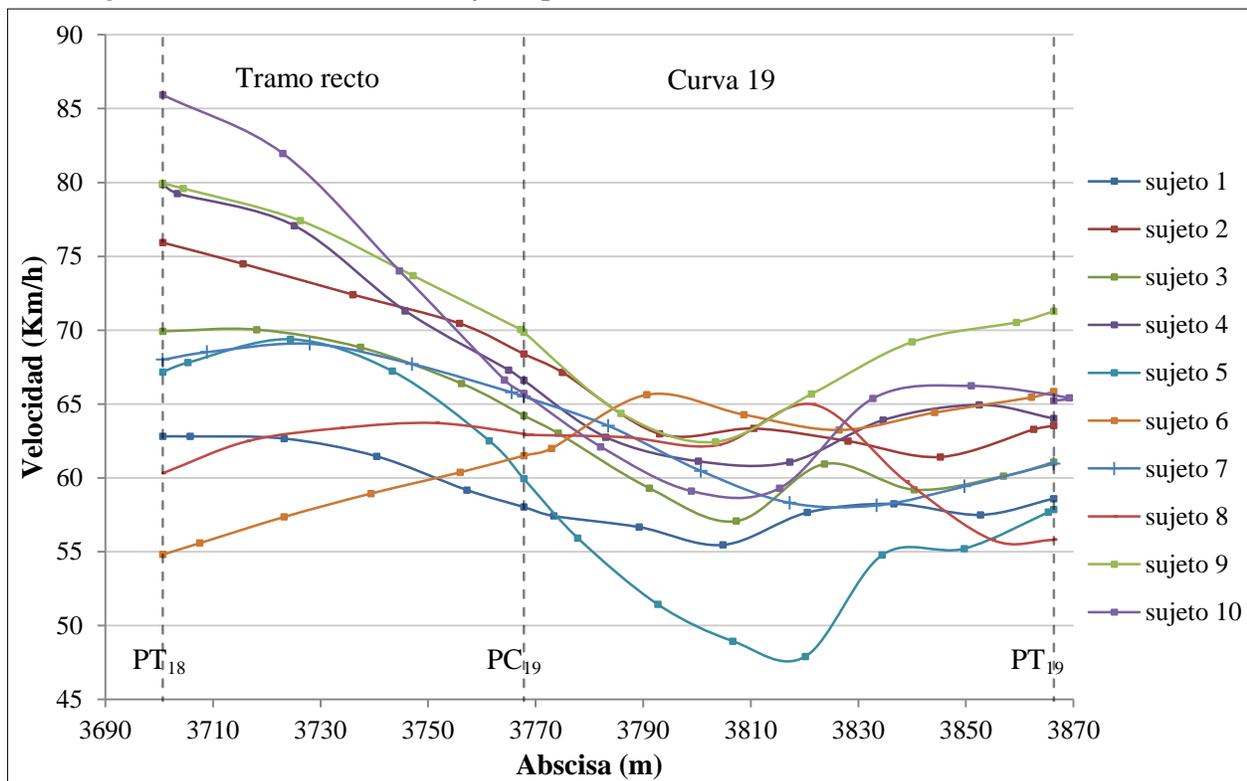
En la figura 28 se aprecia cómo los sujetos disminuyen su velocidad en la entretangencia para llegar a la curva 13 (K2+548).

Figura 29: Deceleración forzada para entrar en la curva 19



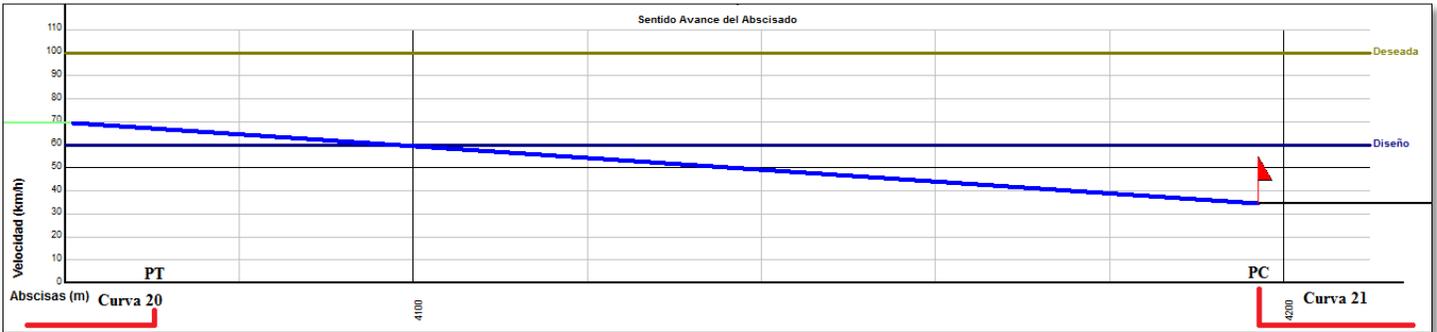
En la figura 29 se aprecia la deceleración para entrar a la curva 19 donde se pasa de 90 km/h a casi 70 km/h en una distancia de 110 metros aproximadamente.

Figura 30: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 19



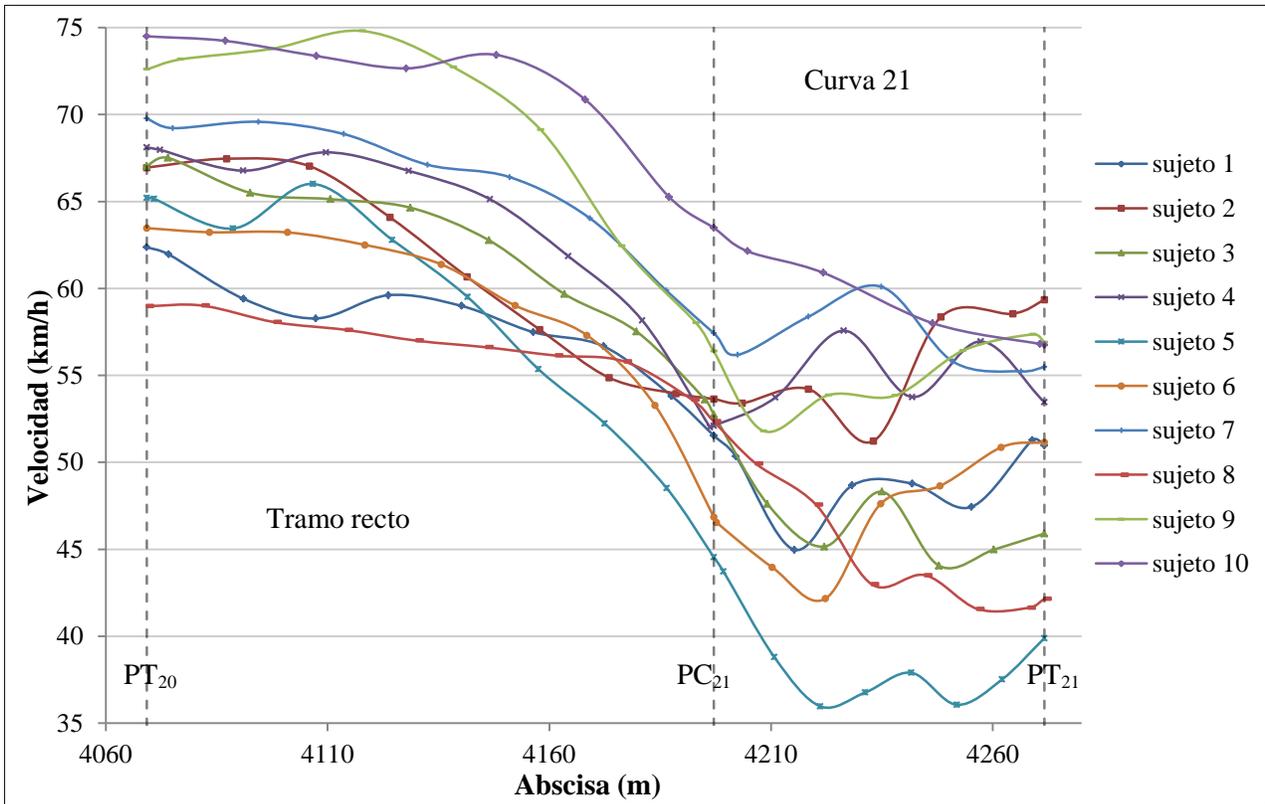
En la figura 30 se observa el comportamiento de los sujetos al disminuir su velocidad entre la curva 18 (K3+595) y la curva 19 (K3+767).

Figura 31: Deceleración forzada para entrar en la curva 21



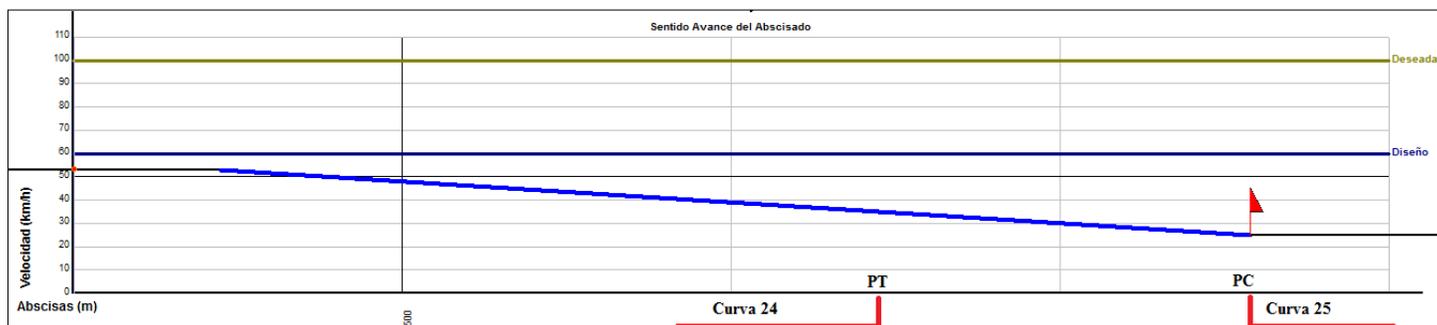
En la figura 31 se observa la deceleración en la entretangencia de las curvas 20 y 21; se reduce velocidad de 70 km/h a 35 km/h en una distancia aproximada de 140 metros.

Figura 32: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 21



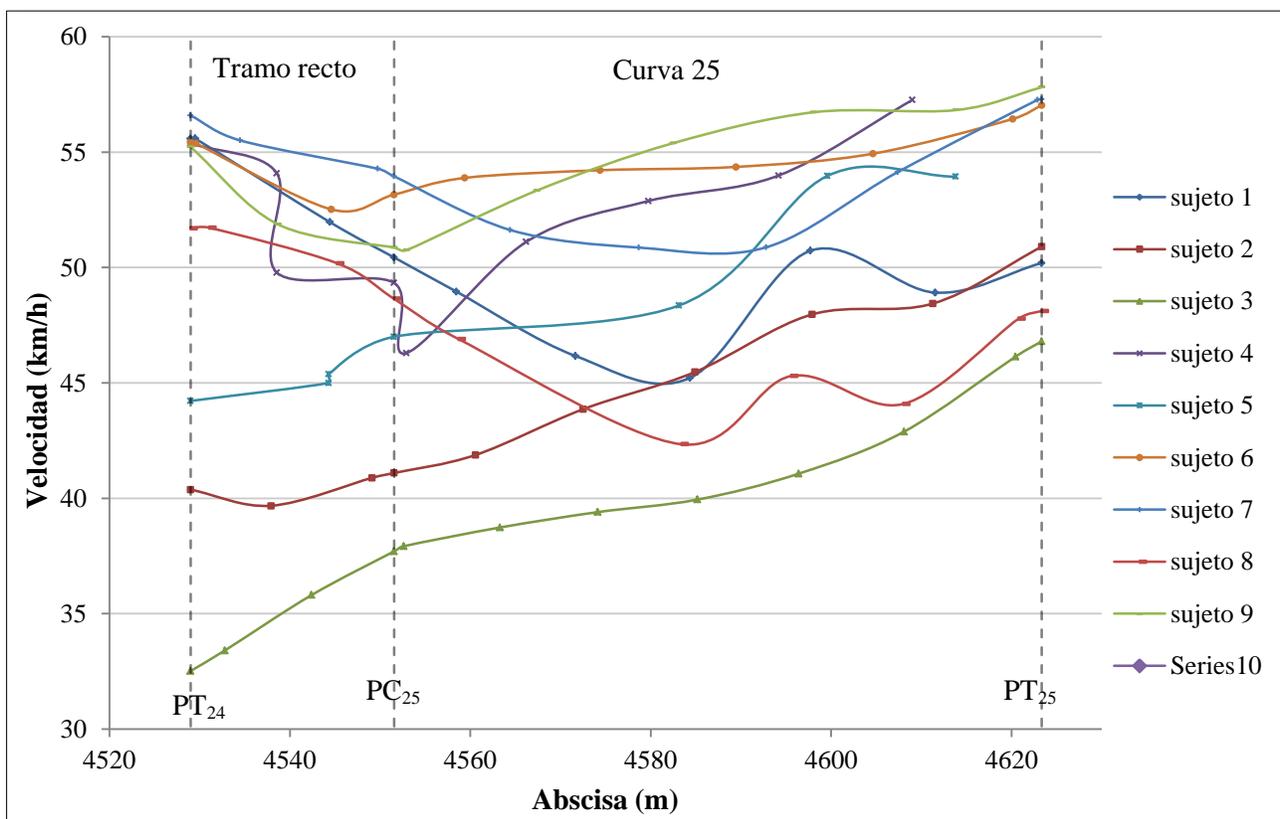
En la figura 32 se observa cómo los sujetos disminuyen su velocidad para tomar la curva 21.

Figura 33: Deceleración forzada para entrar a la curva 25



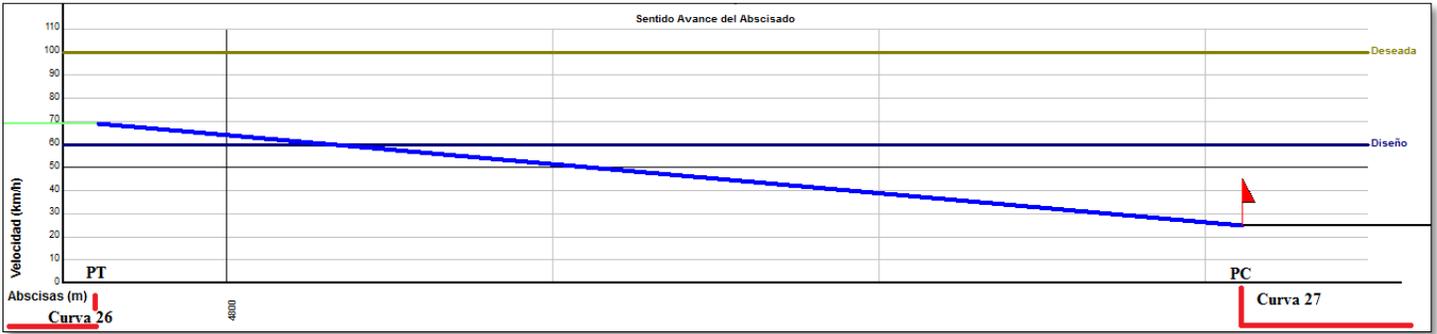
En la figura 33 se observa la deceleración forzada para entrar a la curva 25, donde se pasa de una velocidad de 50 km/h a 25 km/h en 60 metros aproximadamente.

Figura 34: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 25



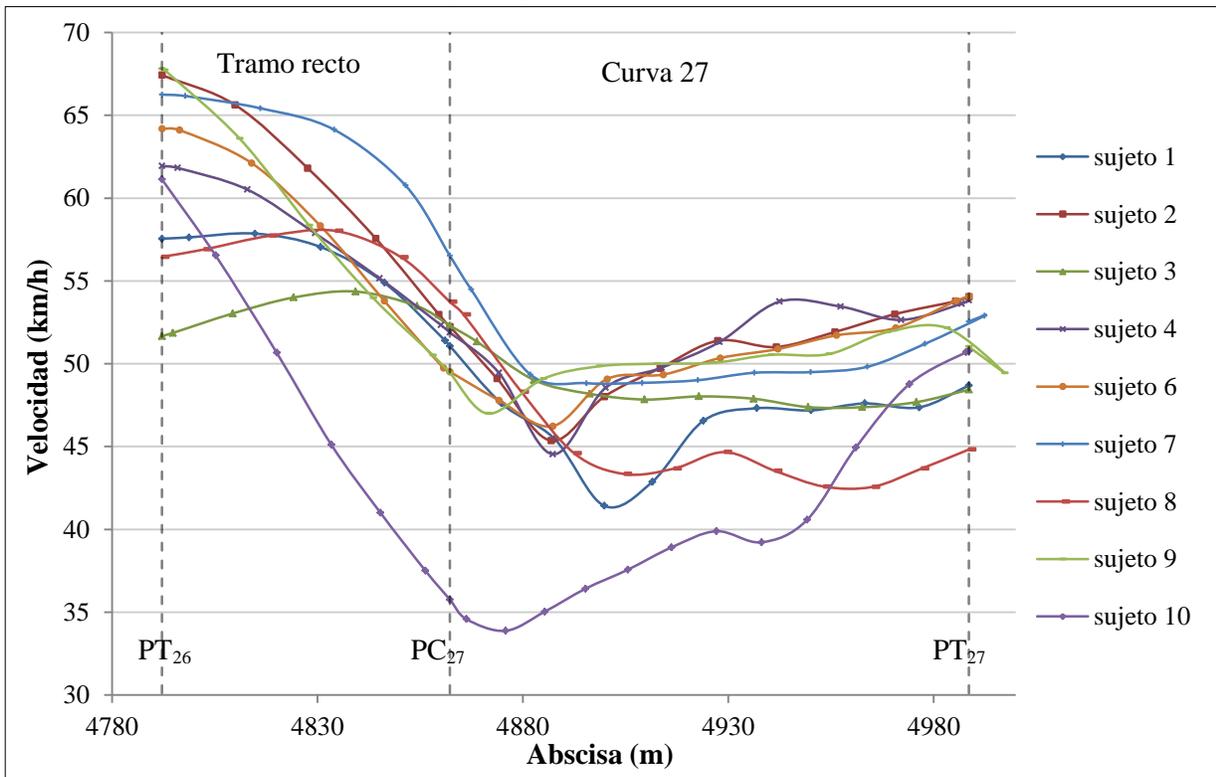
En la figura 34 se observa la reducción de velocidad de la mayoría de conductores en la entretangencia y parte de la curva 25 (K4+551), para finalmente incrementar la velocidad aproximadamente desde la mitad de la curva estudiada.

Figura 35: Deceleración forzada para entrar a la curva 27



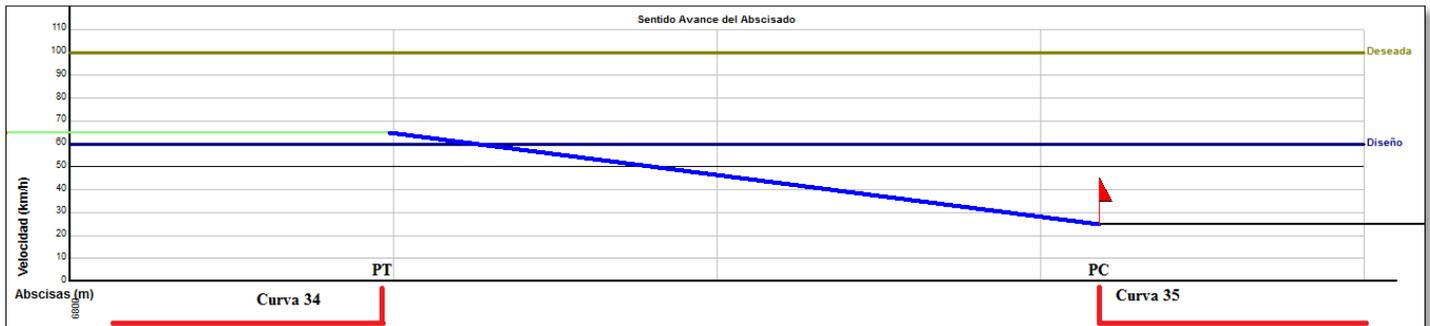
En la figura 35 se detalla la deceleración indicada en el perfil de velocidades; se reduce velocidad de 70 km/h a 25 km/h en un tramo de 70 metros, aproximadamente.

Figura 36: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 27



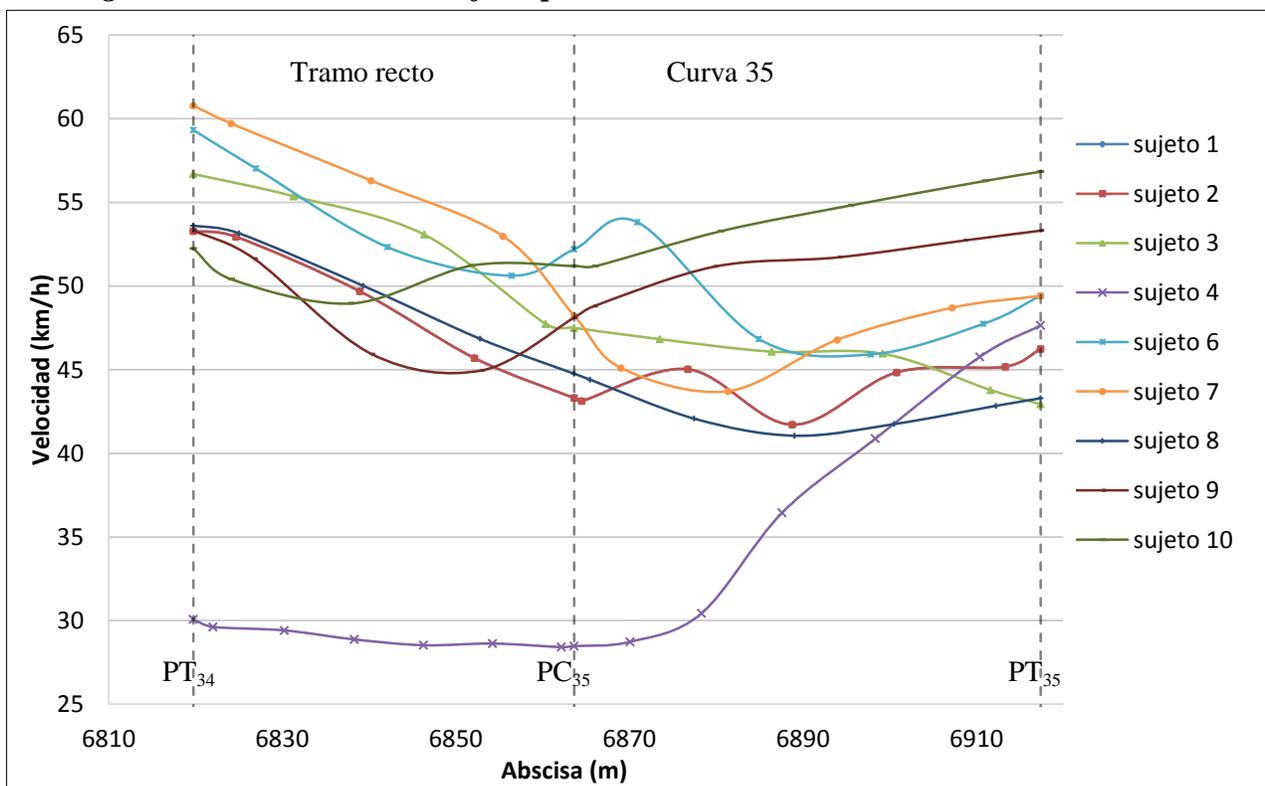
En la figura36 se observa la reducción de velocidad de los sujetos desde la entretangencia y parte de la curva 27 (K4+862) para después nuevamente aumentar la velocidad y salir de la curva.

Figura 37: Deceleración forzada de los sujetos para entrar en la curva 35



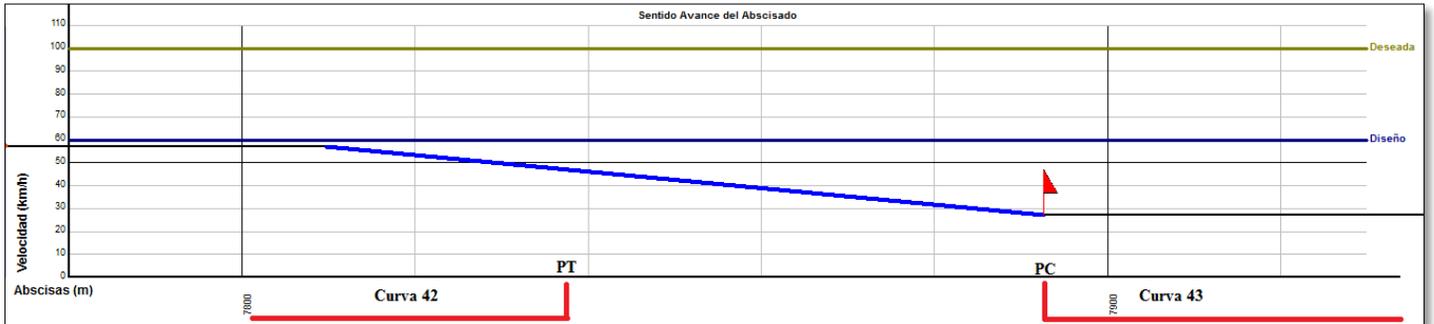
En la figura 37 se detalla la deceleración para tomar la curva 35, para ello se pasa de una velocidad de 65 km/h a 25 km/h en un tramo de 45 metros, aproximadamente.

Figura 38: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 35



En la figura 38 se aprecia la deceleración progresiva de los sujetos para tomar la curva 35 (K6+863) desde la entretangencia anterior hasta más o menos la mitad de la curva estudiada, desde la cual los sujetos aumentan de nuevo su velocidad. En este caso el sujeto 4 está muy alejado del promedio normal por lo que se desechó para el análisis de esta curva.

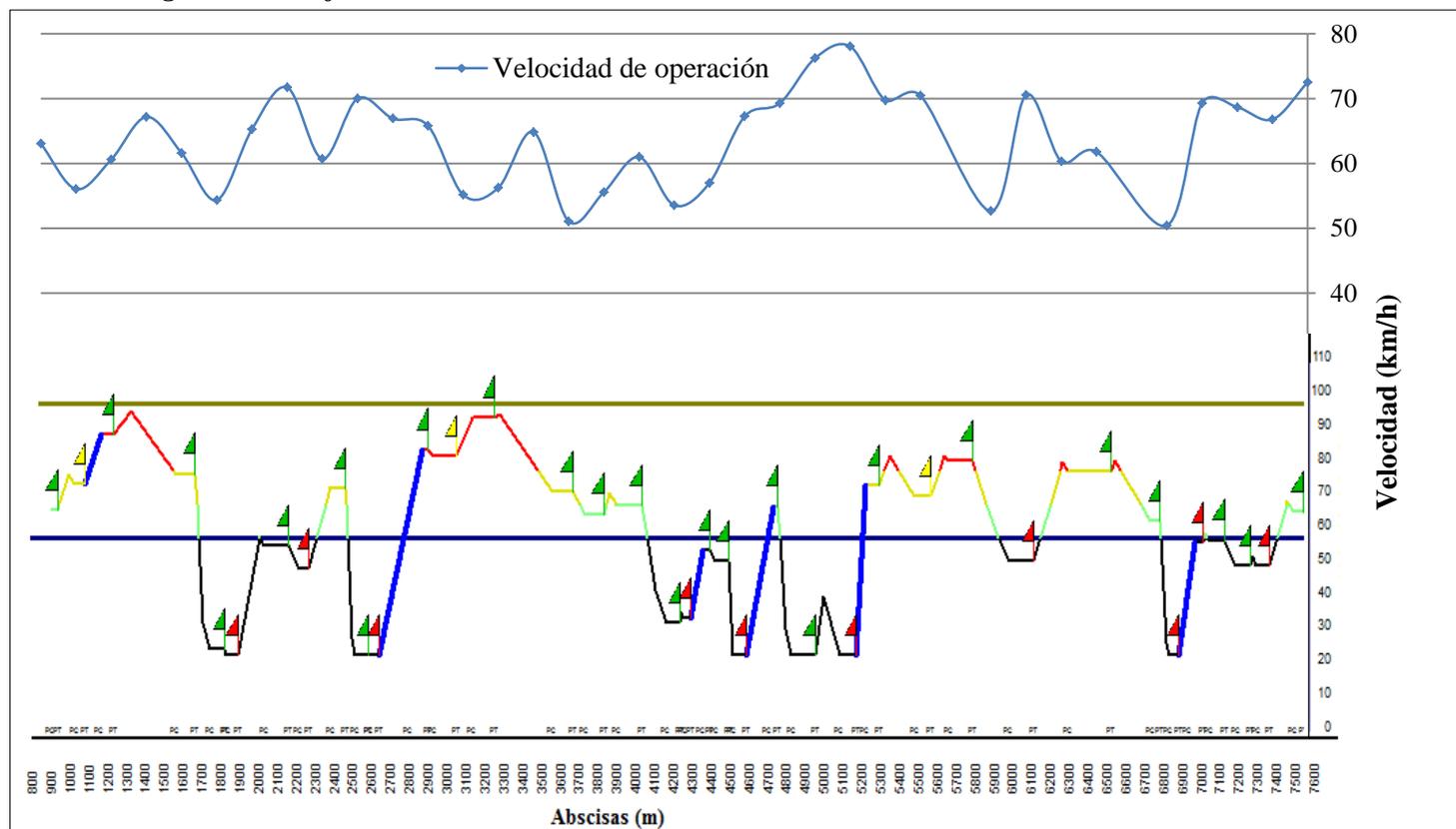
Figura 39: Deceleración forzada para tomar la curva 43



En la figura 39 se observa la deceleración forzada para tomar la curva 43, en este caso se reduce la velocidad de 60 km/h a 30 km/h en 80 metros, aproximadamente. Para esta curva no existen datos de conductores suficientes para realizar la gráfica donde se aprecie la disminución de la velocidad.

5.3 PERFIL DE VELOCIDADES EN SENTIDO CONTRARIO AL ABCISADO

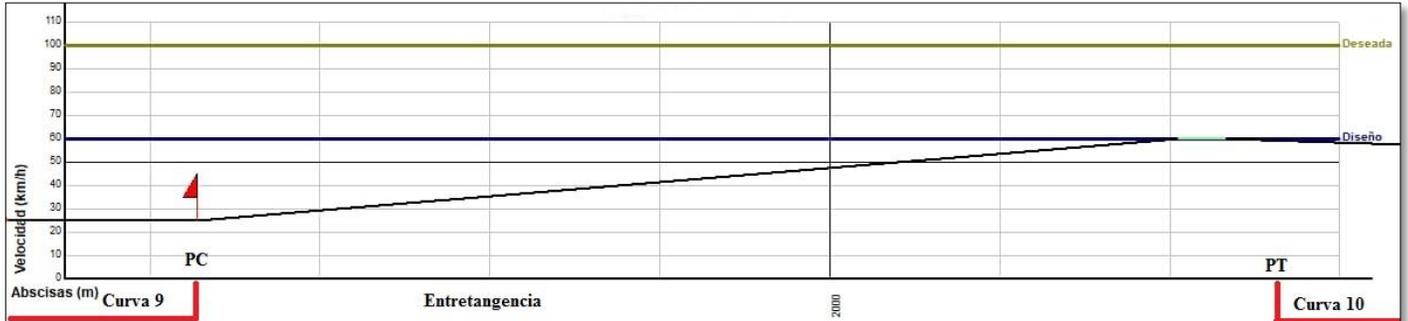
Figura 40: Perfil de velocidades en sentido contrario al abscisado



En la figura 40 se observa la relación entre la velocidad de operación y el perfil de velocidad obtenido del programa TOPO3, en el que se aprecian los cambios de velocidad en el tramo de estudio en el sentido contrario al abscisado. A continuación se analizarán los tramos más críticos, que son en su mayoría los que se presentan en color azul terminando con una bandera de color rojo; en ellos se presentan los cambios de velocidad más significativos antes de tomar las diferentes curvas, las cuales en su mayoría son de radio pequeño, lo que las hace peligrosas para los conductores.

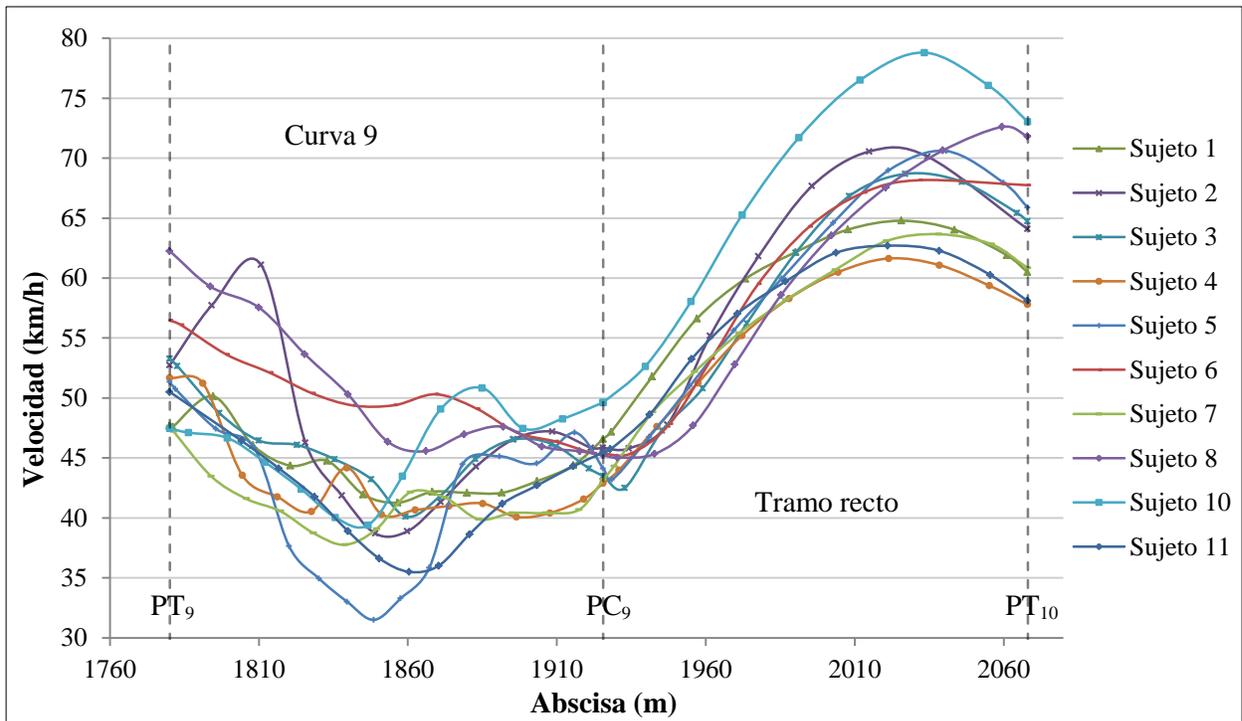
A continuación se analiza el comportamiento real de los conductores al tomar una curva. Se observará si este comportamiento concuerda con el perfil de velocidades obtenido, qué tan similares son los cambios de velocidad, y la tendencia a decelerar.

Figura 41: Deceleración forzada para tomar la curva 9



En la figura 41 se detalla el cambio de velocidad de 60 km/h a 25 km/h para tomar la curva 9 (K1+925), esta deceleración ocurre a lo largo de la entretangencia y parte de la curva 9.

Figura 42: Velocidad de los sujetos para entrar a la curva 9



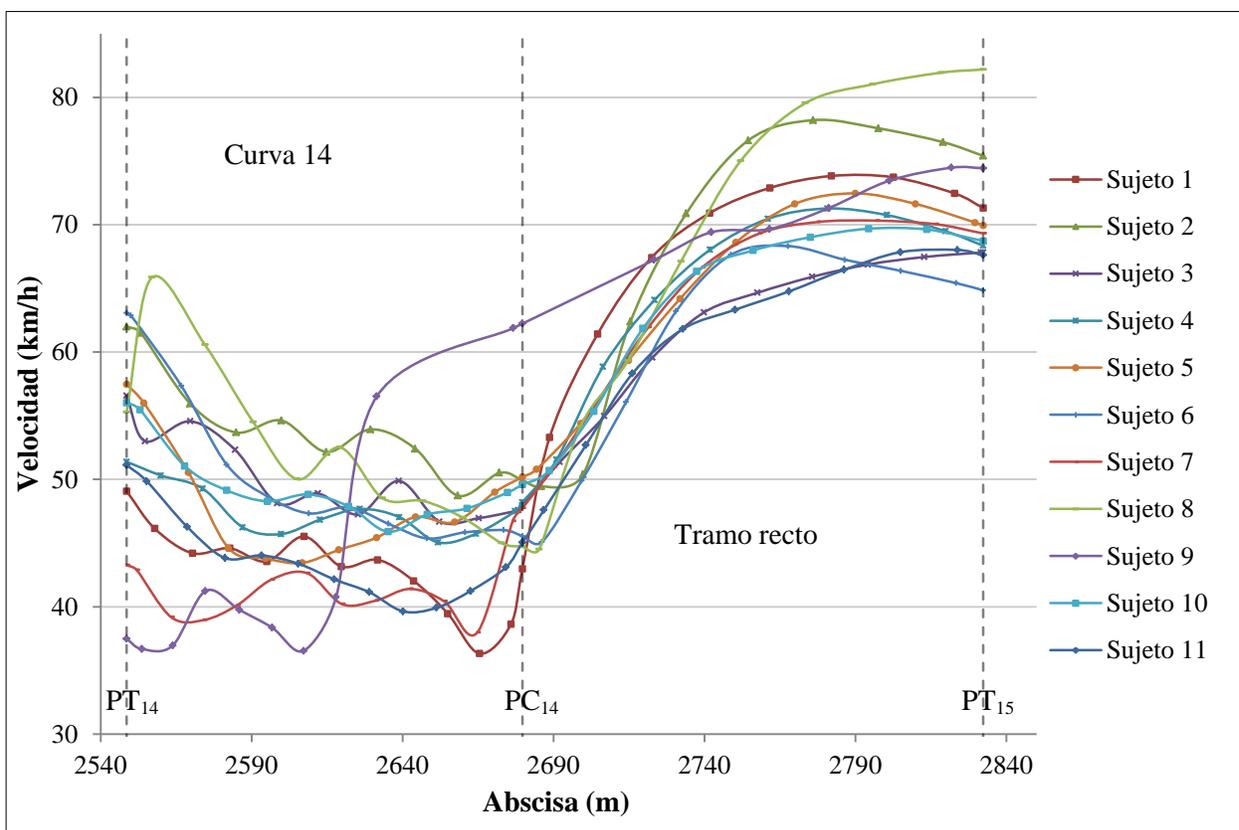
En la figura 42 se observa que los sujetos disminuyen la velocidad en una distancia corta para entrar en la curva 9. Estos resultados son acordes al perfil de velocidades obtenido con el programa TOPO3 ya que se puede apreciar una misma tendencia.

Figura 43: Deceleración forzada para entrar a la curva 14



En la figura 43 se detalla que hay un cambio de velocidad de 85 km/h a 25 km/h. Esta deceleración comienza desde una parte de la curva 15 y el tramo recto siguiente.

Figura 44: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 14



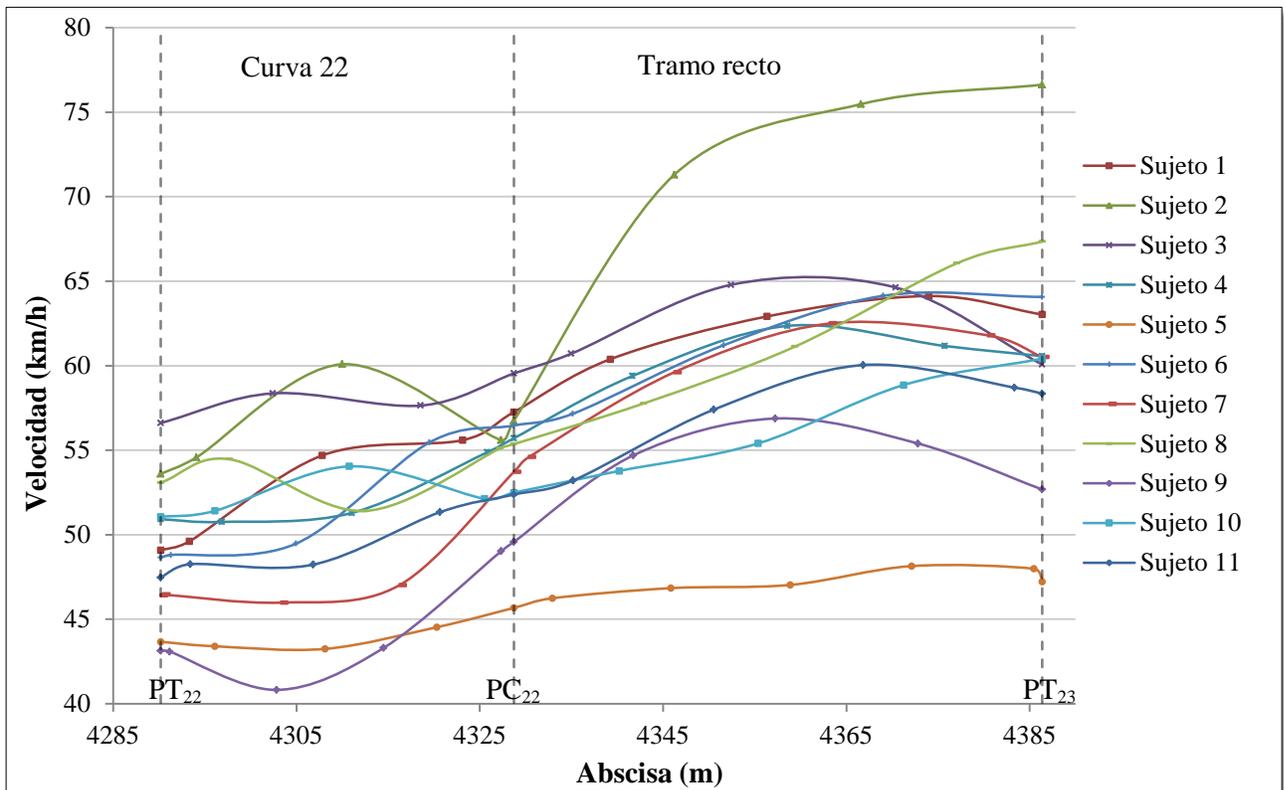
En la figura 44 se observa la deceleración en la entretangencia y parte de la curva 14 (K2+679).

Figura 45: Deceleración forzada para tomar la curva 22



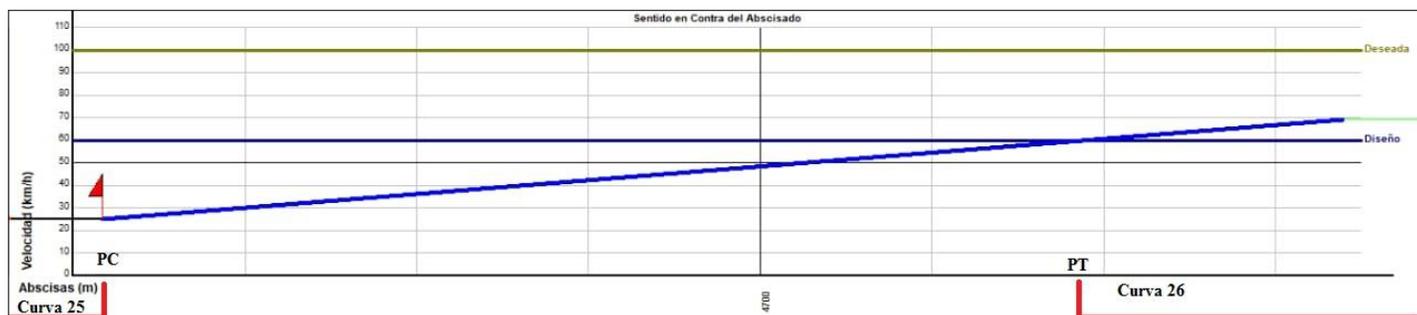
En la figura 45 se detalla cómo la velocidad pasa de 55 km/h a 35 km/h, esto ocurre finalizando la curva 23 y en todo el trayecto de la entretangencia entre estas.

Figura 46: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 22



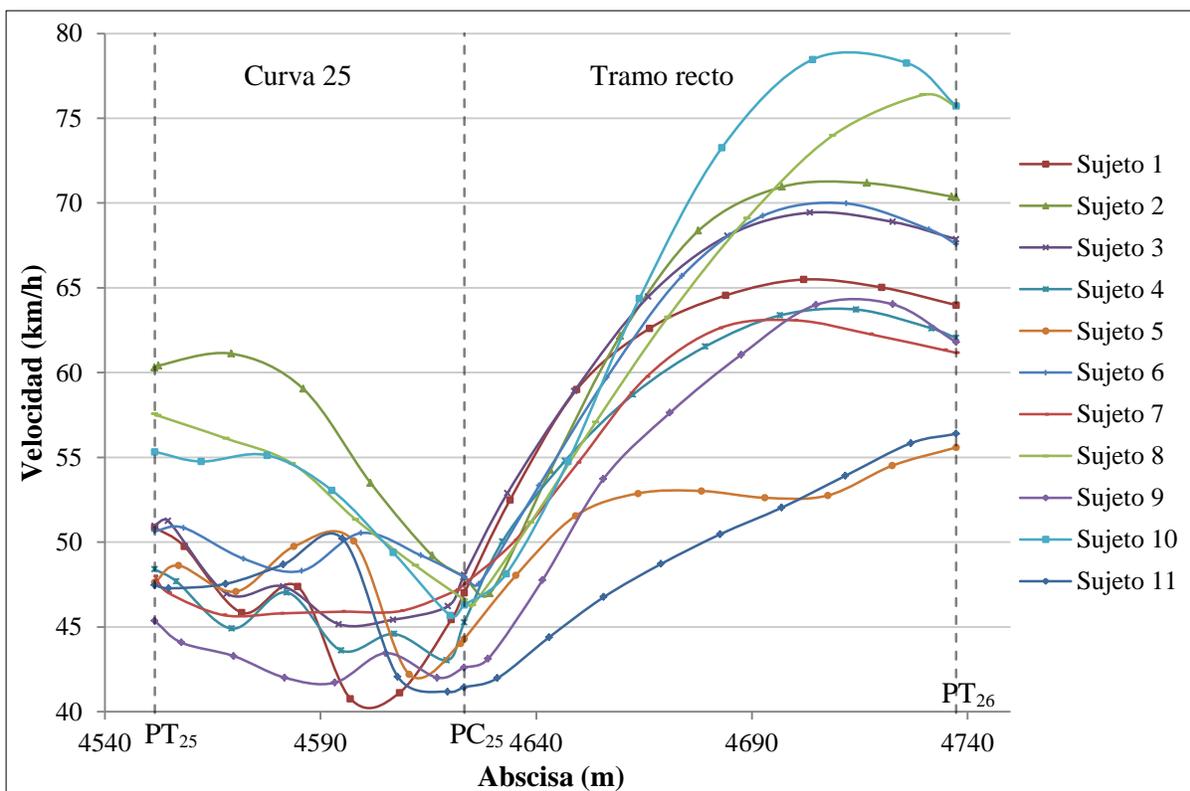
En la figura 46 se aprecia la deceleración de los sujetos para tomar la curva 22 (K4+328), dicha deceleración ocurre en el tramo recto anterior y parte de la curva.

Figura 47: Deceleración forzada para tomar la curva 25



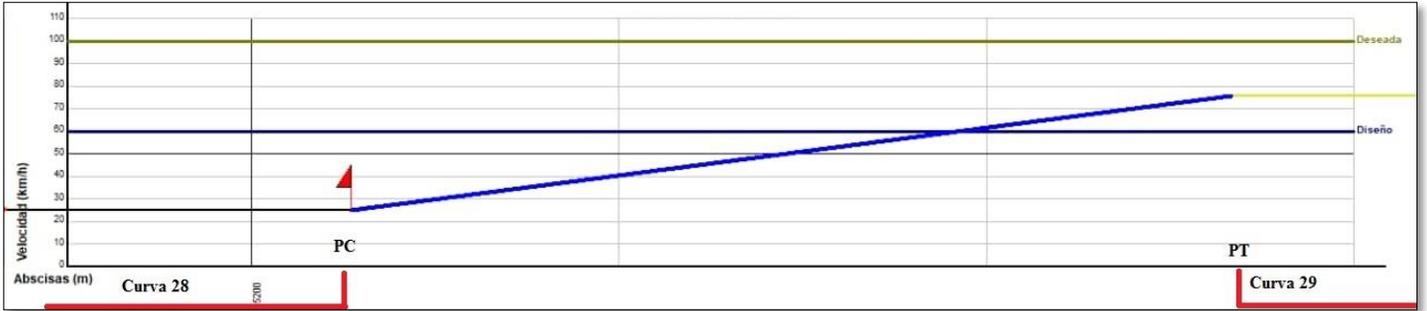
En la figura 47 se detalla que la deceleración comienza aproximadamente desde la mitad de la curva 26 y a lo largo de la entretangencia entre estas, el cambio de velocidad es de 70 km/h a 25 km/h y ocurre en una distancia corta.

Figura 48: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 25



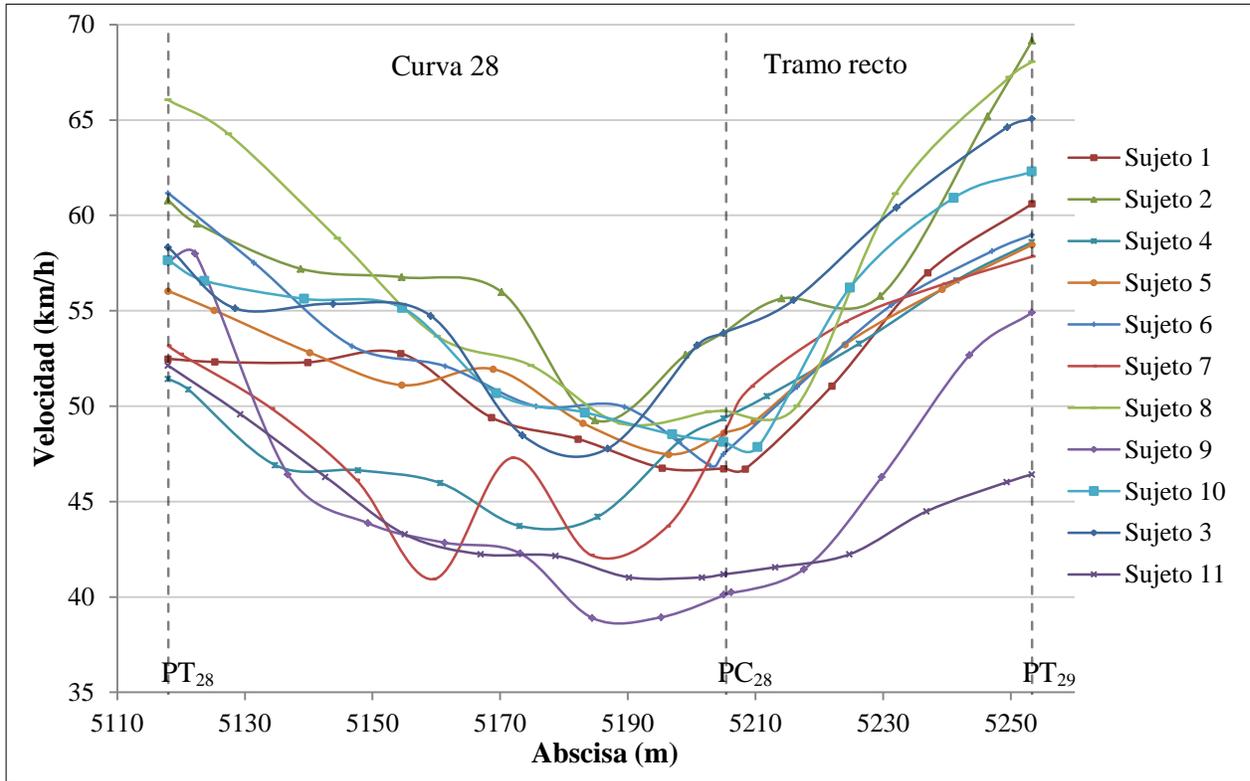
En la figura 48 se observa el cambio de velocidad en la entretangencia y parte de la curva 25 (K4+623), para después aumentar la velocidad progresivamente y salir de la curva.

Figura 49: Deceleración forzada para tomar la curva 28



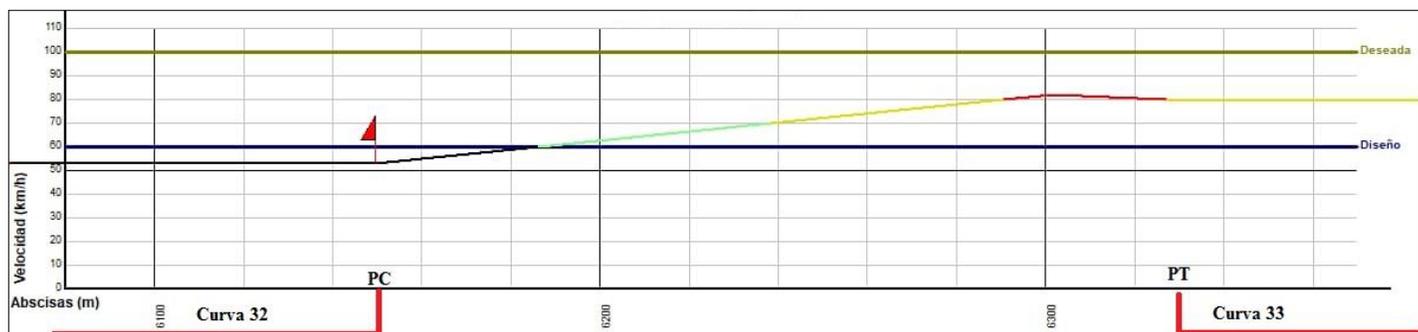
En la figura 49 se observa que la deceleración ocurre a lo largo de la entretangencia, el cambio de velocidad es de 75 km/h a 25 km/h y ocurre en una distancia corta.

Figura 50: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 28



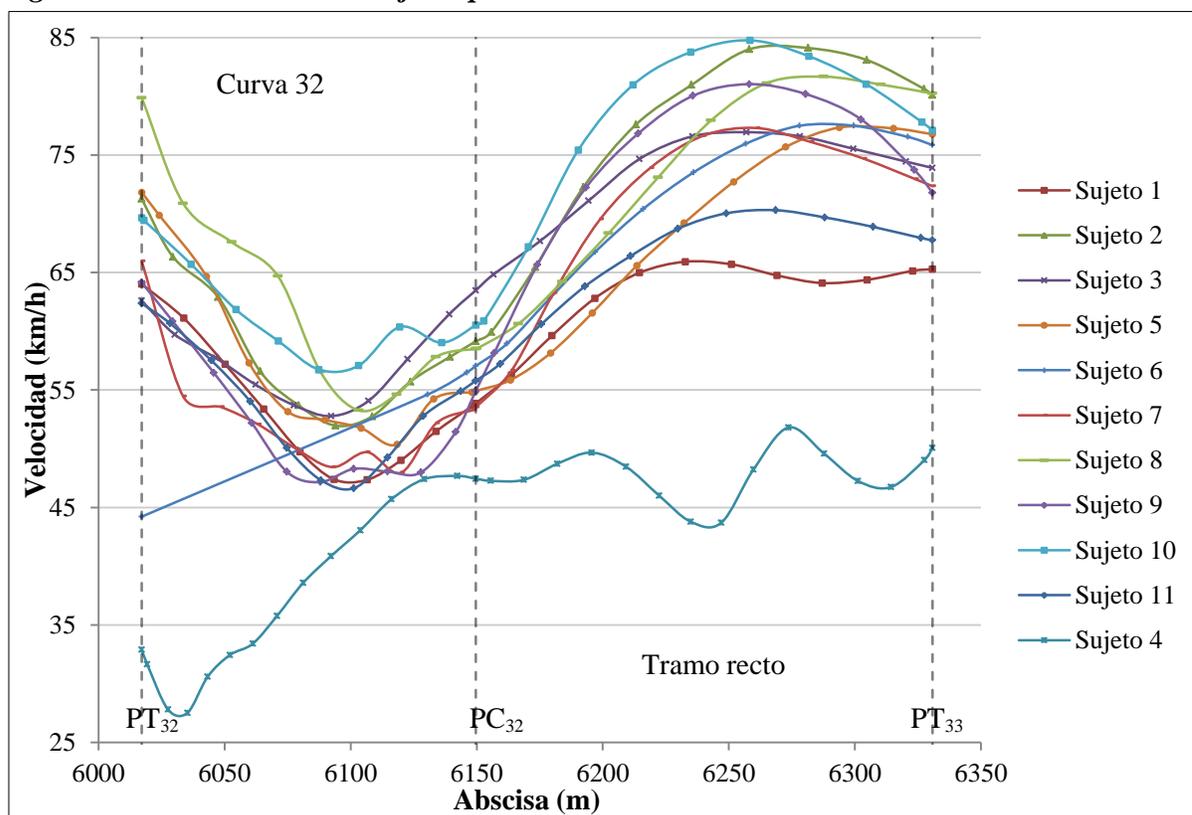
En la figura 50 se observa la deceleración de los sujetos en la entretangencia y parte de la curva 28 (K5+205).

Figura 51: Deceleración forzada para tomar la curva 32



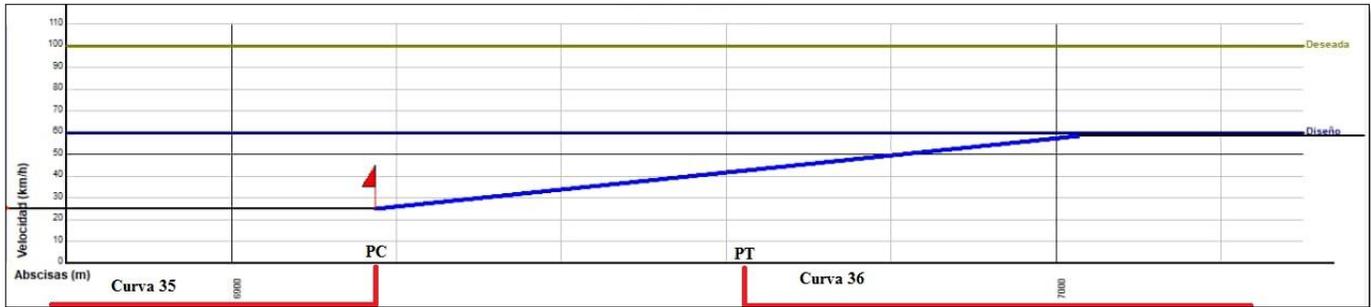
En la figura 51 se detalla que la deceleración comienza a lo largo de la entretangencia, el cambio de velocidad es de 80 km/h a 53 km/h aproximadamente.

Figura 52: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 32



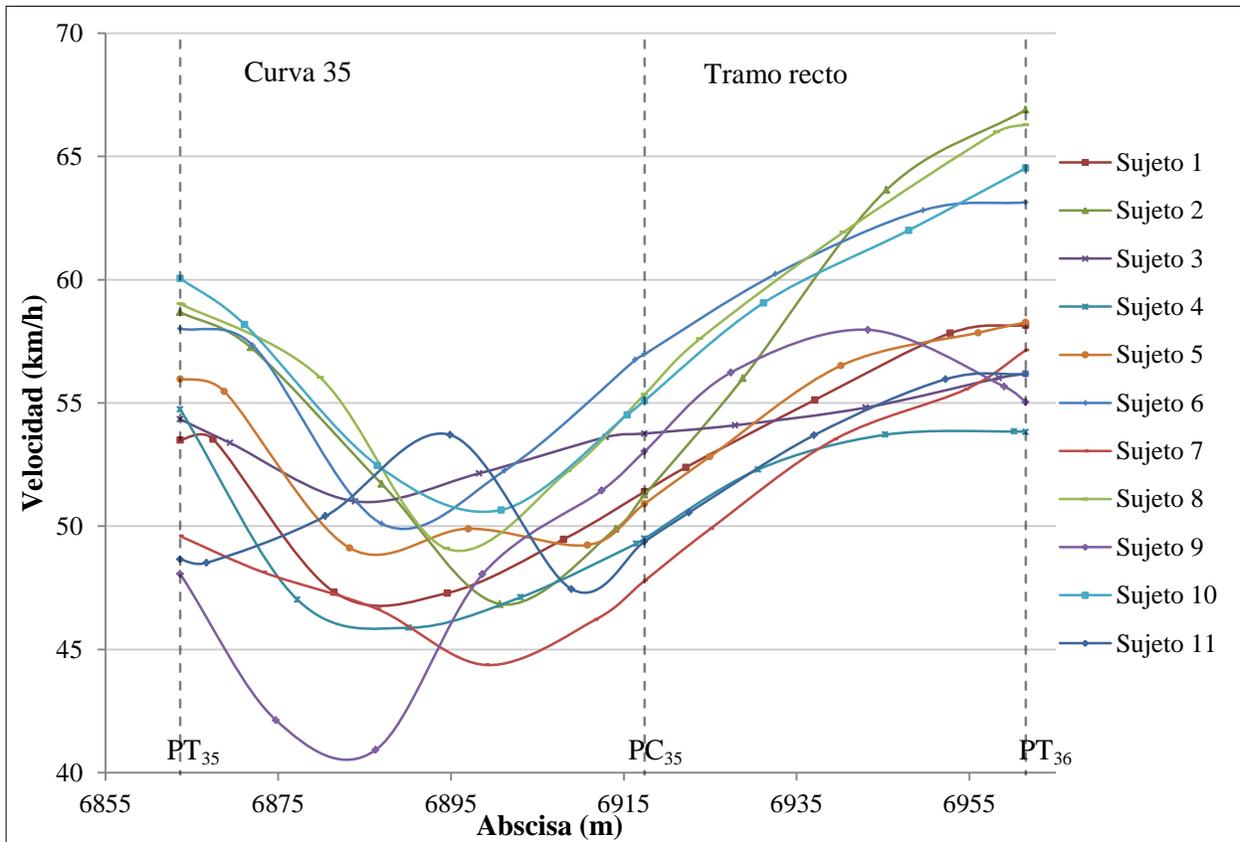
En la figura 52 se observa la deceleración que ocurre en la entretangencia y parte de la curva 32 (K6+149), se detalla que todos los sujetos siguen la tendencia a decelerar excepto el sujeto 4, el cual se encuentra alejado de esta tendencia por lo cual se descarta del análisis de esta curva.

Figura 53: Deceleración forzada para tomar la curva 35



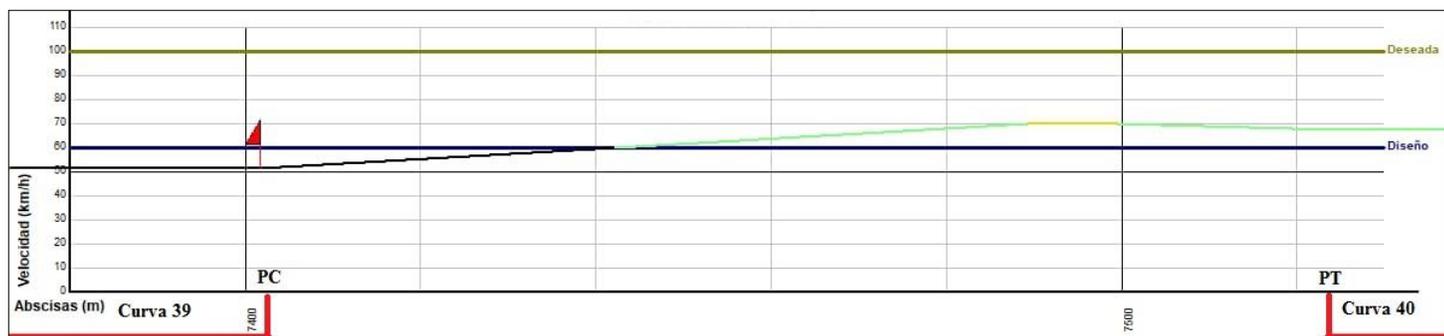
En la figura 53 se detalla la deceleración que comienza en la curva 36 (K7+047) y la entretangencia. El cambio de velocidad de 58 km/h a 25 km/h ocurre en una distancia aproximada de 85 metros.

Figura 54: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 35



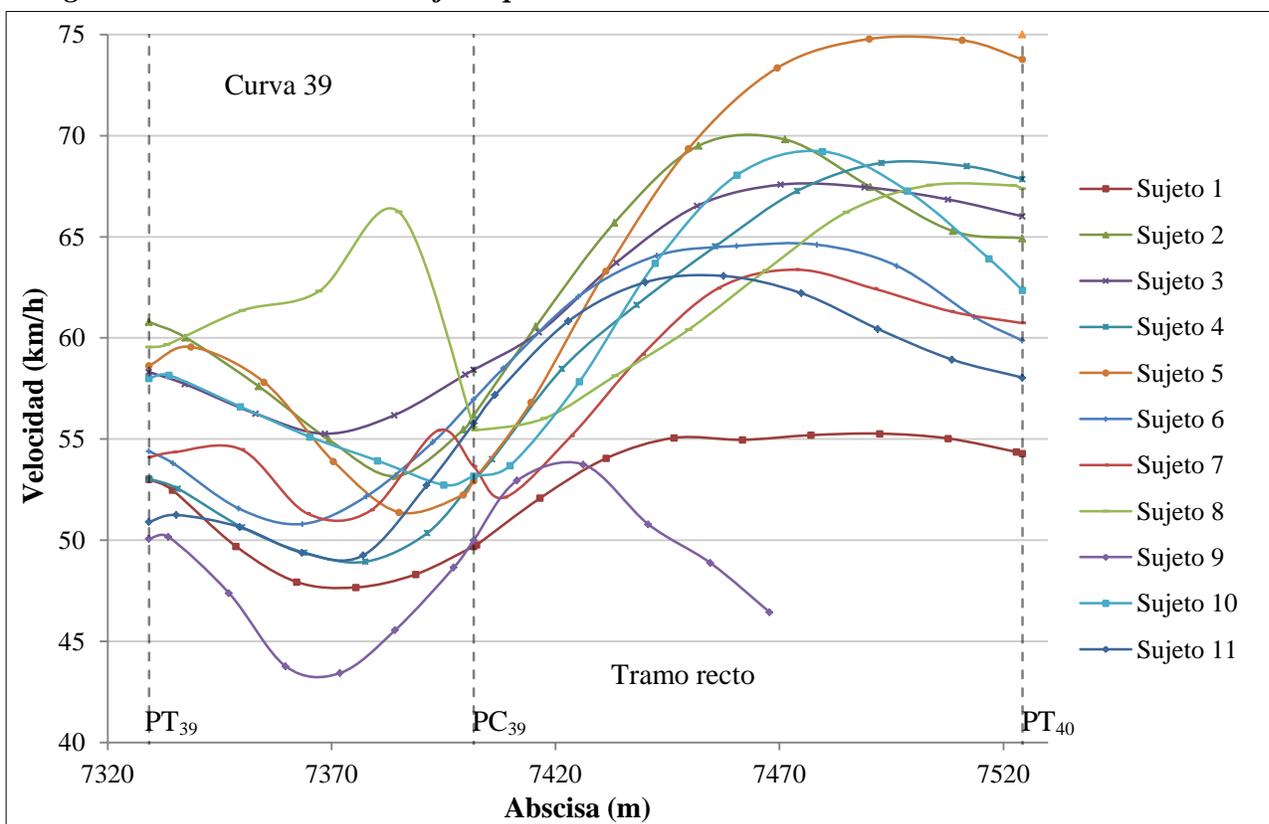
En la figura 54 se observa la disminución de la velocidad de los sujetos en la entretangencia y parte de la curva 35 (K6+917).

Figura 55: Deceleración forzada para tomar la curva 39



En la figura 55 se detalla la deceleración a lo largo de la entretangencia, el cambio de velocidad es de 70 km/h a 50 km/h.

Figura 56: Velocidad de los sujetos para tomar la curva 39



En la figura 56 se detalla que la mayoría de sujetos tienen una tendencia a decelerar a lo largo de la entretangencia y parte de la curva 39 (K7+401), a excepción del sujeto 9 el cual toma la curva 39 con una velocidad menor que los demás sujetos, presentándose además pérdida en algunos datos.

5.4 EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO (VELOCIDAD DE OPERACIÓN VS VELOCIDAD DE DISEÑO)

A continuación se realizará la evaluación de la consistencia del diseño del tramo de estudio, para lo que se tendrán en cuenta tanto las curvas como las entretangencias. Para obtener una calificación general de la consistencia del diseño se utilizara un árbol de decisión.

Para la evaluación de la consistencia del diseño geométrico se aplican los criterios de Lamm (1988, 1990), resumidos en la tabla 14 obtenida del artículo Exploring the Association between Traffic Safety and Geometric Design Consistency Based on Vehicle Speed Metrics (Donnell et al., 2012).

Tabla 14: Criterios de consistencia de diseño y diferencia de velocidad de elementos de diseño adyacentes

Clasificación	Evaluación de consistencia de diseño	Diferencia de velocidad de elementos de diseño adyacentes
Buena	$V_{85} - V_{\text{diseño}} \leq 10 \text{ kph}$	$V_{85 \text{ tangente}} - V_{85 \text{ curva}} \leq 10 \text{ kph}$
Regular	$10 \text{ kph} < V_{85} - V_{\text{diseño}} \leq 20 \text{ kph}$	$10 \text{ kph} < V_{85 \text{ tangente}} - V_{85 \text{ curva}} \leq 20 \text{ kph}$
Pobre	$20 \text{ kph} < V_{85} - V_{\text{diseño}}$	$20 \text{ kph} < V_{85 \text{ tangente}} - V_{85 \text{ curva}}$
1 kph = 0.6 mph		

La tabla 15 muestra la evaluación de la consistencia del diseño en sentido del abscisado para las curvas.

Tabla 15: Evaluación de la consistencia del diseño en el sentido del abscisado

Curva	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Velocidad de diseño inferida V_d (km/h)	Diferencia de velocidades ($V_{85} - V_d$)	Evaluación de la consistencia de diseño
4	68.99	50	18.99	Regular
5	65.56	60	5.56	Buena
6	71.91	60	11.91	Regular
7	66.28	60	6.28	Buena
8 y 9	50.33	40	10.33	Regular
10	59.23	60	0.77	Buena
11	57.21	40	17.21	Regular
12	62.43	60	2.43	Buena
13 y 14	50.58	40	10.58	Regular
15	68.49	60	8.49	Buena
16	68.05	60	8.05	Buena
17	69.18	60	9.18	Buena

Curva	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Velocidad de diseño inferida V_d (km/h)	Diferencia de velocidades ($V_{85} - V_d$)	Evaluación de la consistencia de diseño
18	71.70	60	11.7	Regular
19	63.96	50	13.96	Regular
20	67.73	50	17.73	Regular
21	53.73	40	13.73	Regular
22	54.80	40	14.8	Regular
23	61.06	50	11.06	Regular
24	55.20	50	5.2	Buena
25	52.42	40	12.42	Regular
26	63.28	50	13.28	Regular
27	51.33	40	11.33	Regular
28	56.73	40	16.73	Regular
29	67.36	60	7.36	Buena
30	68.01	60	8.01	Buena
31	68.56	60	8.56	Buena
32	60.55	50	10.55	Regular
33	66.48	60	6.48	Buena
34	62.20	50	12.2	Regular
35	49.59	40	9.59	Buena
36	60.73	50	10.73	Regular
37	65.83	60	5.83	Buena
38	59.82	40	19.82	Regular
39	56.84	40	16.84	Regular
40	62.72	50	12.72	Regular

En la tabla 15 se resume la evaluación de la consistencia del diseño geométrico de todas las curvas del tramo estudiado. Ninguna curva presenta una calificación pobre es decir que la diferencia de velocidad de operación y de diseño de las curvas no supera los 20 km/h.

Tabla 16: Evaluación de la consistencia del diseño en sentido contrario al abscisado

Curva	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Velocidad de diseño inferida V_d (km/h)	Diferencia de velocidades ($V_{85} - V_d$)	Evaluación de la consistencia de diseño
4	72.55	50	22.55	Pobre
5	66.81	60	6.81	Buena
6	68.69	60	8.69	Buena
7	69.31	60	9.31	Buena
8 y 9	50.44	40	10.44	Regular
10	61.80	60	1.8	Buena
11	60.34	40	20.34	Pobre
12	70.60	60	10.6	Regular
13 y 14	52.67	40	12.67	Regular
15	70.46	60	10.46	Regular
16	69.77	60	9.77	Buena
17	78.07	60	18.07	Regular
18	76.25	60	16.25	Regular
19	69.31	50	19.31	Regular
20	67.28	50	17.28	Regular
21	57.02	40	17.02	Regular
22	53.56	40	13.56	Regular
23	61.01	50	11.01	Regular
24	55.59	50	5.59	Buena
25	51.07	40	11.07	Regular
26	64.86	50	14.86	Regular
27	56.27	40	16.27	Regular
28	55.18	40	15.18	Regular
29	65.84	60	5.84	Buena
30	66.95	60	6.95	Buena
31	70.04	60	10.04	Regular
32	60.73	50	10.73	Regular
33	71.75	60	11.75	Regular
34	65.30	50	15.3	Regular
35	54.37	40	14.37	Regular
36	61.62	50	11.62	Regular
37	67.20	60	7.2	Buena
38	60.63	40	20.63	Pobre
39	56.06	40	16.06	Regular
40	63.08	50	13.08	Regular

En la tabla 16 se resume la evaluación de la consistencia del diseño geométrico en sentido contrario al abscisado; las curvas 4, 11 y 38 presentan una calificación pobre de su consistencia, es decir la diferencia entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño supera los 20 km/h.

5.5 EVALUACIÓN DE LA DIFERENCIA DE VELOCIDAD ENTRE LA CURVA Y LA RECTA PRECEDENTE

Se utilizó la tabla 14, la cual evalúa la diferencia de velocidades entre el elemento inmediatamente anterior (entretangencia) y la curva, para lo que se tiene en cuenta la diferencia entre las dos velocidades de operación (percentil 85 de las velocidades).

Tabla 17: Evaluación de la consistencia del diseño de los elementos adyacentes en el sentido del abscisado

Tangente/curva	Velocidad de operación (V_{85}) entretangencia (km/h)	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Diferencia de velocidades (V_{85} tangente - V_{85} curva)	Evaluación de la consistencia de diseño
4	72.03	68.99	3.04	Buena
5	65.94	65.56	0.38	Buena
6	67.43	71.91	4.48	Buena
7	78.74	66.28	12.47	Regular
8 y 9	64.07	50.33	13.74	Regular
10	60.94	59.23	1.71	Buena
11	58.66	57.21	1.45	Buena
12	62.51	62.43	0.08	Buena
13 y 14	58.50	50.58	7.92	Buena
15	67.29	68.49	1.20	Buena
16	67.99	68.05	0.07	Buena
17	65.61	69.18	3.58	Buena
18	77.32	71.70	5.62	Buena
19	70.35	63.96	6.39	Buena
20	65.50	67.73	2.23	Buena
21	66.30	53.73	12.57	Regular
22	51.27	54.80	3.53	Buena
23	60.09	61.06	0.96	Buena
24	57.41	55.20	2.21	Buena
25	49.33	52.42	3.09	Buena
26	61.58	63.28	1.70	Buena
27	60.19	51.33	8.86	Buena
28	54.76	56.73	1.98	Buena

Tangente/curva	Velocidad de operación (V_{85}) entretangencia (km/h)	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Diferencia de velocidades (V_{85} tangente - V_{85} curva)	Evaluación de la consistencia de diseño
29	59.87	67.36	7.50	Buena
30	72.89	68.01	4.88	Buena
31	65.07	68.56	3.49	Buena
32	68.95	60.55	8.40	Buena
33	64.96	66.48	1.53	Buena
34	71.00	62.20	8.80	Buena
35	51.05	49.59	1.47	Buena
36	52.43	60.73	8.30	Buena
37	62.25	65.83	3.58	Buena
38	64.65	59.82	4.83	Buena
39	55.88	56.84	0.96	Buena
40	60.23	62.72	2.50	Buena

En la tabla 17 se muestra el resumen de la evaluación de la consistencia del diseño de los elementos adyacentes, es decir la entretangencia anterior y la curvas. Tres elementos presentan una calificación regular (elementos entretangencia/curva 7, 8 y 21). Ningún elemento (entretangencia/curva) presenta una calificación pobre.

Tabla 18: Evaluación de la consistencia de los elementos adyacentes en sentido contrario al abscisado

Tangente/curva	Velocidad de operación (V_{85}) entretangencia (km/h)	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Diferencia de velocidades (V_{85} tangente - V_{85} curva)	Evaluación de la consistencia de diseño
4	70.45	72.55	2.10	Buena
5	66.20	66.81	0.61	Buena
6	79.75	68.69	11.06	Regular
7	59.30	69.31	10.01	Regular
8 y 9	67.25	50.44	16.81	Regular
10	59.17	61.80	2.63	Buena
11	72.93	60.34	12.59	Regular
12	59.95	70.60	10.66	Regular
13 y 14	71.87	52.67	19.19	Regular
15	69.20	70.46	1.26	Buena
16	73.86	69.77	4.09	Buena
17	83.56	78.07	5.50	Buena

Tangente/curva	Velocidad de operación (V_{85}) entretangencia (km/h)	Velocidad de operación (V_{85}) curva (km/h)	Diferencia de velocidades (V_{85} tangente - V_{85} curva)	Evaluación de la consistencia de diseño
18	69.53	76.25	6.73	Buena
19	69.04	69.31	0.27	Buena
20	66.64	67.28	0.64	Buena
21	48.34	57.02	8.68	Buena
22	61.56	53.56	8.00	Buena
23	56.84	61.01	4.18	Buena
24	51.53	55.59	4.06	Buena
25	65.82	51.07	14.75	Regular
26	63.31	64.86	1.56	Buena
27	63.63	56.27	7.36	Buena
28	56.90	55.18	1.72	Buena
29	69.14	65.84	3.30	Buena
30	64.90	66.95	2.05	Buena
31	76.47	70.04	6.43	Buena
32	74.65	60.73	13.92	Regular
33	76.28	71.75	4.53	Buena
34	57.62	65.30	7.68	Buena
35	58.44	54.37	4.07	Buena
36	65.03	61.62	3.41	Buena
37	65.45	67.20	1.74	Buena
38	55.45	60.63	5.17	Buena
39	64.93	56.06	8.87	Buena
40	62.12	63.08	0.96	Buena

En la tabla 18 se resume la evaluación de consistencia de los elementos adyacentes en sentido contrario al abscisado; ocho pares de elementos presentan calificación regular (elementos entretangencia/curva 6, 7, 8, 11, 12, 13, 25 y 32). No se presenta ningún par de elementos con calificación pobre.

5.6 ARBOL DE DECISIÓN

Un árbol de decisión o clasificación es un conjunto de condiciones organizadas en una estructura jerárquica en forma de árbol, de tal manera que la decisión final a tomar se puede determinar siguiendo las condiciones que se cumplen desde la raíz del árbol hasta alguna de sus hojas (Hernández Orallo et al., 2004); (Garach, 2013).

Los árboles de decisión son muy útiles cuando se quieren analizar conjuntamente variables cualitativas (o categóricas) y variables cuantitativas (o numéricas). Los árboles de decisión usados para predecir variables cualitativas reciben el nombre de árboles de clasificación. Cuando los árboles de decisión se usan para predecir variables cuantitativas se llaman árboles de regresión (Hernández Orallo et al., 2004); (Garach, 2013).

Un árbol de decisión está formado por los siguientes elementos (Díaz Martínez, 2007); (Garach, 2013):

- **Nodo raíz.** Es el que está situado en la parte superior del árbol. En él se encuentra el problema a resolver, es decir, concentra todo el conjunto de datos.
- **Nodos hijos.** Son nodos internos (nodos de decisión) que representan la verificación de una condición sobre un atributo. De ellos siempre salen ramas que corresponden a los posibles valores del atributo considerado en ese nodo. Cada rama conduce a otro nodo hijo o a un nodo final o nodo hoja.
- **Nodo hoja o nodo final.** Son nodos que se refieren a una decisión (clasificación) y representan las etiquetas clase, es decir representan la predicción del problema para todas aquellas instancias que alcanza esa hoja. De estos ya no sale ninguna rama.
- **Ramas.** Pueden interpretarse como una regla del “Si-Entonces”, representan el valor de la condición comprobada en el nodo del cual derivan.

Para calificar el tramo se usará el árbol de decisión de la figura 57, tomado del trabajo doctoral “Medida de la consistencia en carreteras convencionales y su relación con la seguridad vial. Aplicación a la provincia de Granada”. En el árbol de decisión se muestran las condiciones ficticias para conocer el tipo de consistencia en un tramo de carretera según el porcentaje de elementos buenos y según el porcentaje de elementos pobres que contenga el tramo (Garach, 2013).

Figura 57: Árbol de decisión para calificar la consistencia de diseño

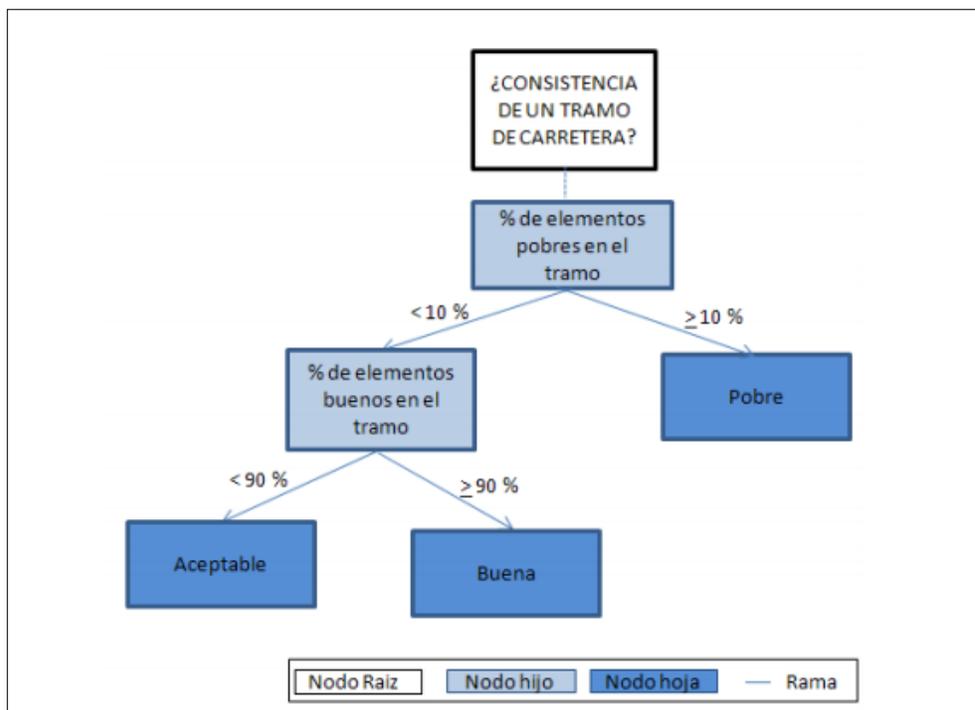


Tabla 19: Calificación general de la consistencia del diseño de las curvas en el tramo estudiado

	Porcentaje elementos buenos (%)	Porcentaje elementos regulares (%)	Porcentaje elementos pobres (%)	Calificación general de consistencia de diseño
Sentido del abscisado	40.00	60.00	0.00	Aceptable
Sentido contrario al abscisado	25.71	65.71	8.57	Aceptable

La consistencia de diseño de las curvas en el sentido del abscisado obtuvo una calificación de “aceptable” según el árbol de decisión aplicando los criterios de Lamm, es decir que menos del 90% (40%) de los elementos tienen una calificación buena y no presenta elementos con calificación pobre. En sentido contrario al abscisado se presentó una calificación igual, pero con un porcentaje menor de elementos buenos (25.71%) además de presentar elementos con calificación pobre (8.57%).

Tabla 20: Calificación general de la consistencia del diseño de elementos adyacentes en el tramo estudiado

	Porcentaje de elementos adyacentes buenos (%)	Porcentaje de elementos adyacentes regulares (%)	Porcentaje de elementos adyacentes malos (%)	Calificación general de consistencia de diseño
Sentido del abscisado	91.43	8.57	0.00	Buena
Sentido contrario al abscisado	77.14	22.86	0.00	Aceptable

La consistencia de diseño de elementos adyacentes en el sentido del abscisado obtuvo una calificación de “buena” es decir que el porcentaje de elementos adyacentes buenos es mayor al 90% (91.43%). En sentido contrario al abscisado se obtuvo una calificación de “aceptable” con un porcentaje de elementos buenos menor al 90% (77.14%), se destaca que en ningún sentido de recorrido se presentaron elementos adyacentes con calificación de “pobre”.

5.7 CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió sacar las siguientes conclusiones, aplicables al tramo en estudio:

- Relación entre velocidad de operación, velocidad de diseño y velocidad límite existente.
 - La velocidad de operación es mayor que la velocidad límite existente. En el sentido del abscisado, en algunos puntos la diferencia ronda los 20 km/h, por lo que la velocidad límite existente se podría aumentar hasta en 10 km/h, sin exceder la velocidad de diseño.
En sentido contrario al abscisado solamente en un punto la velocidad de operación es menor a la velocidad límite existente, pero como en el caso anterior, en algunos se circula hasta 20 km/h por encima de la velocidad límite existente, por lo que también se propone aumentar la velocidad límite en 10 km/h.
 - En cuanto a la relación entre la velocidad de diseño y operación en el sentido del abscisado y basados en los criterios de la consistencia del diseño, se concluye que esta relación es aceptable pues solamente el 40% de los elementos presentan una diferencia de velocidad menor o igual a 10 km/h.
En sentido contrario al abscisado, la relación entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño es aceptable, pues solamente el 25.71% de los elementos presentan una diferencia de velocidad menor o igual a 10 km/h.
 - La relación entre la velocidad de diseño y la velocidad límite muestra que la señalización existente es acorde a la velocidad de diseño que se definió, lo que refuerza la idea que la velocidad límite debe ser menor o igual que la velocidad de diseño.
 - Las tres relaciones de velocidad se pueden comparar con un concepto teórico llamado armonía de la velocidad, condición que resulta cuando se cumplen tres aspectos básicos.
En primer lugar, la velocidad de diseño debe estar dentro del rango de ± 8 km/h de la velocidad de operación; esto no se cumple en la mayor parte del tramo de estudio, tanto en sentido del abscisado como en sentido contrario.

En segundo lugar, la velocidad de operación debe estar dentro del rango de ± 8 km/h de la velocidad límite (en este caso velocidad límite existente). Esto no se cumple en la mayor parte del tramo, ya que tanto en el sentido del abscisado como en el sentido contrario los sujetos manejan a velocidades superiores a los límites de velocidad establecidos.

En tercer lugar la velocidad límite debe ser menor o igual que la velocidad de diseño. En sentido del abscisado este criterio no se cumple para las curvas 4, 19, 20, 38 y 39, y en sentido contrario no se cumple para las curvas 4, 11, 19, 20, 28 y 39.

En base a lo anterior se puede concluir que en el tramo de vía estudiado no existe una armonía o una correcta relación entre la velocidad de diseño, velocidad de operación y velocidad límite existente.

- También se concluye que la velocidad límite existente es baja, y se podría aumentar en todo el tramo sin exceder la velocidad de diseño.
- Las velocidades de operación en todo el tramo son superiores o iguales a 50 km/h, y algunas superan 70 km/h, indicativo de que los conductores manejan de forma inapropiada ya que no respetan los límites de velocidad existentes. Según los recorridos realizados y los resultados obtenidos, se concluye que dadas las buenas condiciones en la superficie de rodadura de la carretera se puede transitar a velocidades mayores que los límites de velocidad existentes sin afectar la seguridad; por el contrario, se mejoraría la eficacia a la hora de transitar por este tramo de vía.

Al ser esta una vía antigua, los métodos que se usaron para señalizarla no fueron los mismos que se aplicaron para determinar la señalización propuesta en el actual trabajo de investigación. En éste se aplicaron dos distintos métodos, uno el usado por el programa TOPO3 y el otro del programa SEÑALES, los cuales se basan en metodologías distintas y arrojan resultados diferentes.

- Se obtuvo la relación entre la señalización vertical de velocidad límite arrojada por el programa TOPO3, por el programa SEÑALES y la generada con base en mediciones de velocidad de operación.
 - Se concluye que la velocidad límite obtenida con el programa de TOPO3 a lo largo de todo el tramo de estudio adopta un valor de 60 km/h, que sólo cambia en los sitios especiales.
 - Por otro lado, la señalización obtenida con el programa SEÑALES presenta una inconsistencia fundamental, y es que en algunas partes del tramo la velocidad límite propuesta es mayor que la velocidad de diseño debido a que sigue la tendencia de la velocidad de operación.
 - Se recomienda el uso de la señalización generada con el programa TOPO3, pues no excede la velocidad de diseño, como sí lo hace el programa SEÑALES.

6. BIBLIOGRAFÍA

¿Qué es seguridad vial? (2013). Retrieved from <http://culturavial.com/seguridad-vial/que-es-seguridad-vial.html>

AASHTO. (2011). *Design Speed, Operating Speed, and Posted Speed Practices*.

Agudelo Ospina, J. J. (2002). *Manual de Diseño Geométrico*. Medellín, Colombia.

Chan, M. (Organización mundial de la salud). (2009). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial*.

Donnell, E. T., Himes, S. C., Porter, R. J., & Mahoney, K. M. (2009). Understanding Speed Concepts. *Journal of the Transportation Research Board*, 1(1), 9.

<https://doi.org/10.3141/2120-01>

Donnell, E. T., Himes, S. C., Wu, K.-F., & Sasidharan, L. (2012). Exploring the Association between Traffic Safety and Geometric Design Consistency Based on Vehicle Speed Metrics. *Journal of Transportation Engineering*, 1(1), 42.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000553](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000553)

Garach, L. (2013). *Medida de la consistencia en carreteras convencionales y su relación con la seguridad vial. Aplicación a la provincia de Granada*.

Manzano, V. (Dirección nacional de control del tránsito y seguridad vial). (2003).

Normas de diseño geométrico de carreteras. Quito, Ecuador.

Murgueitio, A., Paz, C., Flórez, J., Correa, N., Solano, E., Arboleda, C., & Rivas, N.

(2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá, Colombia.

Paredes, R. (Ministerio de transportes y comunicaciones). (2014). *Manual de carreteras diseño geométrico*. Lima, Perú.

Sánchez, J., Arboleda, C., Bustamante, A., Solano, E., Rivas, N., Flórez, J., & Plazas, M.

(2010). *Método para establecer límites de velocidad en carreteras colombianas*.

Popayán, Colombia.