



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería-Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención
en Ingeniería Civil

Efecto del estilo de conducción en la velocidad de operación en curvas verticales convexas de caminos bidireccionales



Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
Mención en Ingeniería Civil

PABLO ALBERTO CARTES CARTES
CONCEPCIÓN-CHILE
2019

Profesor Guía: Dr. Tomás Echaveguren Navarro
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

Los modelos que predicen la velocidad de operación en términos de la geometría de las carreteras permiten a los ingenieros de carreteras estimar el efecto de los trazados geométricos nuevos y existentes sobre los conductores. También se utilizan para comparar la consistencia de los diseños geométricos comparando la velocidad de diseño (o de proyecto) y la velocidad de operación. Los modelos presuponen que los conductores son individuos homogéneos, sin embargo, los conductores construyen en el tiempo la forma en que conducen por las carreteras en función de sus actitudes y habilidades, configurando lo que se conoce como estilo de conducción.

En el estado del arte se han identificado al menos ocho estilos de conducción, que influyen en la velocidad de circulación de los conductores y, por tanto, en la velocidad de operación. Los modelos velocidad de operación-geometría no consideran este aspecto.

En este trabajo se analiza el efecto de los estilos de conducción sobre la velocidad de operación en curvas verticales convexas de caminos bidireccionales. Para ello, se seleccionaron 16 conductores y se clasificaron según su estilo de conducción mediante el Inventario Multidimensional de Estilos de Conducción. Posteriormente, con cada uno de los conductores se midió en 40 curvas verticales convexas su velocidad de circulación mediante un registrador de datos GPS de 10 Hz montado en cada vehículo. Se calibraron modelos de velocidad de operación - geometría vertical, clasificados según estilos de conducción. Se concluyó que no considerar estilos de conducción en los modelos elimina la sensibilidad de la velocidad de operación ante la geometría vertical de las carreteras y que existen diferencias significativas de hasta 8 km/h de velocidad de operación entre estilos de conducción. Por tanto, resulta relevante incluir la variable estilos de conducción en los modelos predictivos de velocidad de operación en caminos bidireccionales.

AGRADECIMIENTOS

El autor de esta tesis desea agradecer al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) del Ministerio de Educación de Chile, por el financiamiento otorgado al proyecto FONDECYT 1160128, dentro del cual se enmarca este trabajo.



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	II
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Plan de trabajo	3
1.5 Resultados y conclusiones.....	4
1.6 Alcances de la tesis.....	5
1.7 Estructura del informe	5
CAPÍTULO 2 LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CURVAS VERTICALES	6
2.1 Introducción.....	6
2.2 Las curvas verticales convexas.....	6
2.3 Modelos existentes de velocidad de operación en curvas verticales convexas	7
2.4 El estilo de conducción y su efecto en la velocidad de operación.....	9
2.5 Conclusiones.....	10
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN.....	12
3.1 Introducción.....	12
3.2 Procedimiento de calibración del modelo	12
3.3 El modelo conceptual	13
3.4 Formulación del modelo a calibrar.....	14
3.5 Estimación del tamaño de la muestra	15
3.6 Conclusiones.....	15
CAPÍTULO 4 OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN EN TERRENO	17
4.1 Introducción.....	17
4.2 Selección de curvas verticales convexas	17

4.3 Selección de conductores	18
4.4 Mediciones de terreno	19
4.5 Conclusiones.....	19
CAPÍTULO 5 CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS	21
5.1 Introducción.....	21
5.2 Obtención de la geometría de las curvas verticales convexas.....	21
5.3 Agrupación de curvas verticales convexas.....	22
5.4 Obtención de la velocidad de circulación por conductor	24
5.5 Clasificación de los conductores según estilos de conducción	26
5.6 Relación entre la velocidad de circulación y la geometría de la curva	26
5.7 Estimación de la velocidad de operación	28
5.8 Conclusiones.....	29
CAPÍTULO 6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN.....	30
6.1 Introducción.....	30
6.2 Calibración de los modelos de velocidad de operación.....	30
6.3 Validación de los modelos de velocidad de operación.....	31
6.4 Análisis de los modelos de velocidad de operación calibrados.....	32
6.5 Conclusiones.....	34
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Modelos existentes de velocidad de operación en curvas verticales convexas	8
Tabla 5.1 Parámetros geométricos de las CVC	23
Tabla 5.2 Grupos de estilos de conducción según la velocidad de circulación de cada conductor...	26
Tabla 5.3 Diferencia de velocidad de circulación por punto de la CVC	27
Tabla 5.4 Correlación lineal de Pearson con la velocidad de circulación por grupo de conductores	27
Tabla 5.5 Base de datos de la velocidad del percentil 85 para calibrar	28
Tabla 6.1 Modelos calibrados para cada grupo de conductores	30
Tabla 6.2 Diferencias de velocidad de operación entre los modelos calibrados	32



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Plan de trabajo.....	3
Figura 2.1 Elementos de una curva vertical convexa aislada	6
Figura 3.1 Procedimiento de calibración del modelo de velocidad de operación en CVC	13
Figura 3.2 Modelo conceptual de velocidad de operación	14
Figura 4.1 CVC seleccionadas para medición de velocidad	18
Figura 5.1 Obtención de la geometría usando diagramas de pendiente de una CVC.....	22
Figura 5.2. Datos crudos de velocidad en el punto P ₁	24
Figura 5.3. Datos crudos de velocidad en el punto P ₂	25
Figura 5.4. Datos crudos de velocidad en el punto P ₃	25
Figura 5.5. Datos crudos de velocidad en el punto P ₄	25
Figura 6.1. Modelos de velocidad de operación.....	31
Figura 6.2. Velocidad de operación observada y modelada por grupo de conductores	31
Figura 6.3. Error cuadrático medio de la velocidad de percentil 85 observada respecto a la medida	32
Figura 6.4. Comparación entre los modelos de este estudio y el modelo de Fitzpatrick <i>et al.</i> (2000)	33

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los modelos que predicen la velocidad de operación a partir de la geometría de las carreteras permiten a los ingenieros de carreteras estimar el efecto de los trazados geométricos nuevos y existentes sobre los conductores. También se utilizan para comparar la consistencia de los diseños geométricos comparando la velocidad de diseño (o de proyecto) y la velocidad de operación.

Existe una amplia variedad de modelos de este tipo para alineamientos horizontales, mas no así para alineamientos verticales. En efecto, solo los modelos de Fitzpatrick *et al.* (2000), García *et al.* (2012) y Abbas *et al.* (2012) predicen directamente el comportamiento de la velocidad de operación en curvas verticales. Estos modelos estiman la velocidad de operación en condición de flujo libre, en términos de parámetros geométricos de curvas verticales, tales como curvatura vertical o diferencial de pendientes longitudinales. Asumen que los conductores son individuos homogéneos que pertenecen a una misma población de conductores y que responden de manera similar a las condiciones geométricas que les imponen los trazados de las carreteras.

La velocidad de operación depende de diversos factores, entre los cuales la geometría de las carreteras es solo uno de ellos. En efecto, también influye en la velocidad de operación factores ambientales, del vehículo e individuales. En particular, la evidencia empírica muestra que los conductores eligen la forma en que desean conducir por las carreteras y que en el tiempo construyen su estilo de conducción en función de sus características personales y habilidades (Elander *et al.*, 1993; Lajunen y Summala., 1995). Taubman – Ben – Ari *et al.* (2004) determinaron que los estilos de conducción no son únicos y que se pueden agrupar en ocho clases que van desde estilos “prudentes” hasta “agresivos”. Asimismo, García (2014) determinó en un estudio piloto que la velocidad de operación de vehículos livianos en pendientes largas resultaba estadísticamente diferente según los estilos de conducción clasificados por Taubman – Ben – Ari *et al.* (2004). Por tanto, es plausible considerar que los diversos estilos de conducción pueden introducir cambios significativos en la predicción de la velocidad de operación en términos de la geometría de los trazados verticales.

1.2 Hipótesis

El estilo de conducción produce diferencias estadísticamente significativas sobre la velocidad de operación en curvas verticales convexas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el efecto del estilo de conducción sobre la velocidad de operación de vehículos livianos aplicado al caso de curvas verticales convexas de caminos bidireccionales.

1.3.2 Objetivos específicos

- 
- a) Caracterizar las variables geométricas, operacionales y del estilo de conducción relevantes para modelar la velocidad de operación en curvas verticales convexas.
 - b) Definir los sitios de prueba para la recolección de datos de terreno a partir de un tamaño muestral mínimo.
 - c) Elaborar una base de datos suficiente para la modelación de las relaciones entre las variables explicativas
 - d) Calibrar los modelos de velocidad de operación en curvas verticales convexas.

1.4 Plan de trabajo

El plan de trabajo constó de cuatro etapas: revisión del estado del arte, diseño experimental del modelo, mediciones de datos de terreno y modelación de la velocidad de operación. La secuencia de las actividades realizadas se muestra en la Figura 1.1.

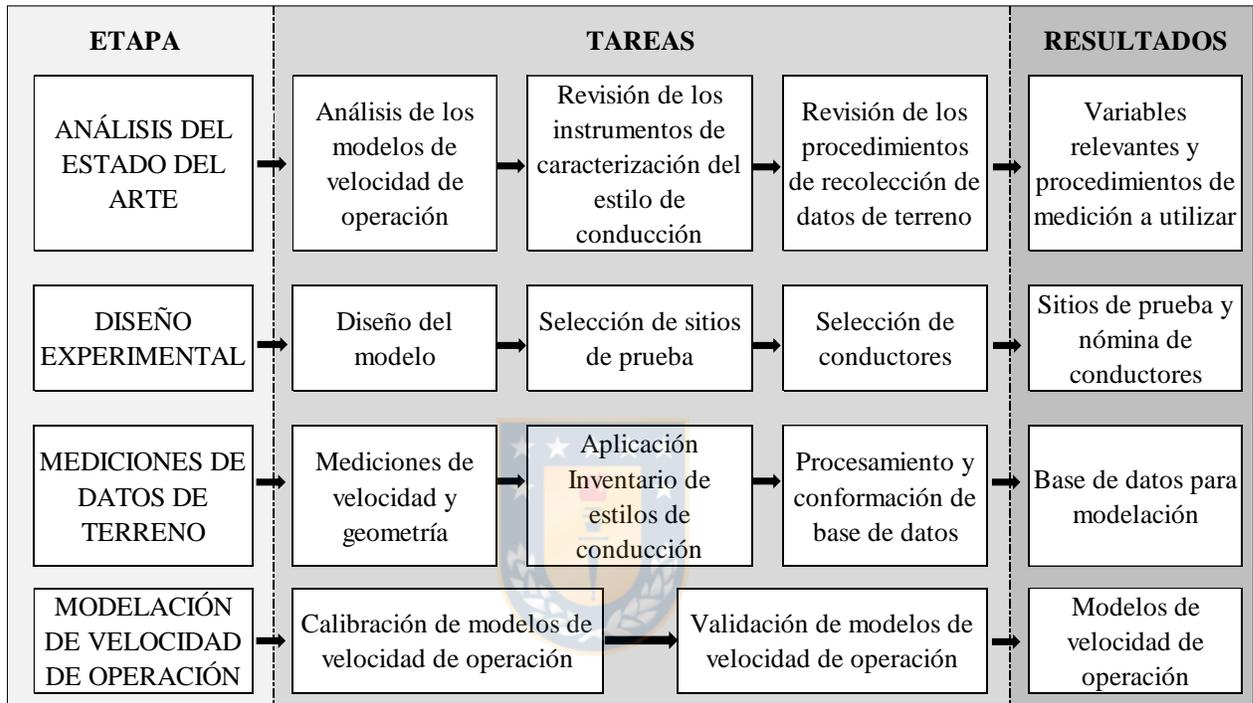


Figura 1.1 Plan de trabajo

En el análisis del estado del arte se revisaron los modelos de velocidad de operación en curvas verticales convexas para identificar las variables relevantes, las formas funcionales de los modelos y el comportamiento de los conductores. Se revisaron los instrumentos de caracterización del estilo de conducción. Por último, se revisaron los procedimientos de recolección de datos de terreno utilizados en los modelos de curvas convexas y de otros elementos geométricos.

En el diseño experimental se elaboró el procedimiento de calibración del modelo de velocidad de operación para sistematizar la modelación. Se formuló el modelo a partir de un modelo conceptual, con el cual se determinó un tamaño muestral y se seleccionaron las secciones de prueba y los conductores a utilizar en las mediciones de datos de terreno.

En las mediciones de datos de terreno se obtuvo la velocidad y parámetros geométricos. Se aplicó a cada conductor el Inventario Multidimensional de Estilos de Conducción. Se realizó un análisis de patrones de comportamiento con el que se obtuvo la velocidad de operación, la geometría de las secciones de prueba y los estilos de conducción que conformaron la base de datos.

En la modelación de velocidad de operación se calibraron y validaron los modelos de velocidad de operación. Finalmente, se analizó el comportamiento de los conductores en curvas verticales convexas.

1.5 Resultados y conclusiones

Se calibraron modelos de velocidad de operación – curvatura vertical en curvas verticales convexas para dos grupos de conductores clasificados según su estilo de conducción, obtenido con el Inventario Multidimensional de Estilos de Conducción.

La diferencia en la velocidad de operación de grupos diferentes de conductores clasificados según su estilo de conducción es de hasta 8 km/h. La diferencia de velocidad de operación entre la mínima y máxima curvatura vertical cuando se agrupan todos los conductores es de 3,5 km/h y cuando se separan por estilo de conducción entre 6,9 y 7,4 km/h. Se concluyó que, cuando se agrupan los conductores la velocidad de operación no se hace sensible a la curvatura vertical y cuando se separan por estilo de conducción si lo es.

La velocidad de operación para conductores con estilos de conducción “prudente” y “ansioso” es sistemáticamente menor, en todo el rango de curvatura vertical modelado, a la de conductores con estilos de conducción “agresivo”, “reducción de estrés” y “riesgo y alta velocidad”.

Se concluyó que no considerar estilos de conducción en los modelos enmascara la sensibilidad de la velocidad de operación ante la geometría vertical de las carreteras. Por tanto, resulta relevante incluir la variable estilos de conducción en los modelos predictivos de velocidad de operación en caminos bidireccionales.

1.6 Alcances de la tesis

Para la ejecución del trabajo se consideraron los siguientes alcances y limitaciones: caminos bidireccionales, de una pista por sentido, con pavimento en buen estado y ubicados en la región del Biobío; curvas verticales convexas en recta y con pendiente longitudinal entre -8 y 8%; mediciones en vehículos livianos con conductores que circulen regularmente por caminos bidireccionales, en condición de flujo libre, de día y con buen tiempo atmosférico (sin lluvia). La limitación principal en la elección de los caminos fue el tiempo de conducción, el cual no debía sobrepasar las cinco horas para no producir fatiga en los conductores. La ubicación geográfica de los caminos limitó la pendiente longitudinal.

1.7 Estructura del informe

El informe se estructuró en siete capítulos. El primero presenta la motivación, hipótesis, objetivos, alcances de la tesis, el plan de trabajo y los principales resultados y conclusiones. En el segundo se describe la curva vertical convexa, se analizan los modelos de velocidad de operación presentes en la literatura, se define el estilo de conducción y se describe cómo afecta a la velocidad de operación. En el tercero se presenta el procedimiento de calibración del modelo. Se formula el modelo y se determinan las variables de interés con las cuales se estima el tamaño muestral. En el cuarto se presenta el procedimiento de selección de las curvas verticales convexas, de selección de los conductores y de medición de los datos de terreno. En el quinto se configura la base de datos para la modelación. Se presenta el procedimiento de obtención de la geometría de los sitios de prueba, de la velocidad de circulación de los conductores y de sus estilos de conducción. Se realiza un análisis de patrones de comportamiento de la velocidad de circulación con el cual se estima la velocidad de operación. En el sexto se calibran, validan y analizan los modelos de velocidad de operación. Finalmente, en el séptimo se entregan las conclusiones y líneas de investigación futuras del trabajo.

CAPÍTULO 2 LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN EN CURVAS VERTICALES

2.1 Introducción

En este capítulo se define la curva vertical convexa y su geometría. Además, se describen y analizan los modelos de velocidad de operación de curvas verticales convexas desarrollados en la literatura. Por otro lado, se describen los factores que afectan el comportamiento de los conductores durante el proceso de conducción. Se define el estilo de conducción y se presentan los instrumentos para medirlo. Por último, se describe cómo el estilo de conducción caracteriza al comportamiento del conductor y cómo incide en la velocidad de operación.

2.2 Las curvas verticales convexas

El alineamiento vertical es una sucesión de pendientes uniformes enlazadas por curvas verticales aisladas o compuestas. Las curvas verticales pueden ser convexas o cóncavas (cresta y valle). Proporcionan cambios graduales de la pendiente longitudinal cuando existen cambios en su signo y magnitud. Una curva vertical aislada se compone de una única concavidad. La Figura 2.1 muestra los elementos de una curva vertical convexa (CVC). Consta de una tangente de aproximación con una pendiente uniforme I_1 y una longitud L_1 que comienza en P_1 ; un arco de longitud L que comienza en P_2 y termina en P_4 ; y una tangente de salida con una pendiente uniforme I_2 y una longitud L_2 que termina en P_5 .

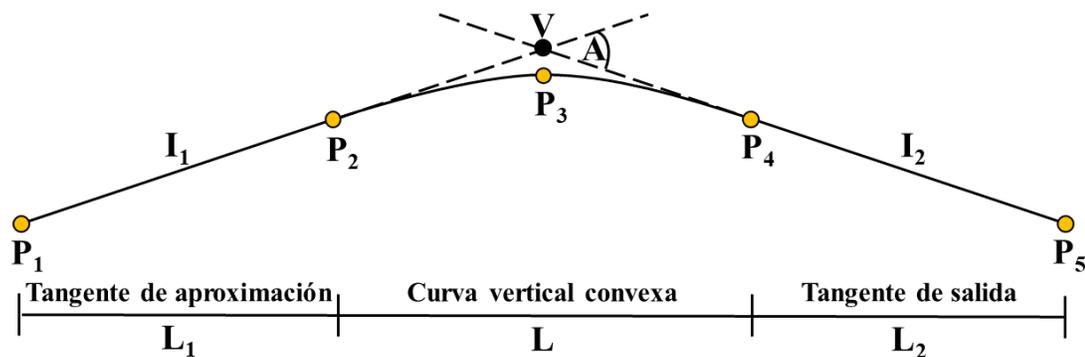


Figura 2.1 Elementos de una curva vertical convexa aislada

La curvatura de la CVC (K en $m/\%$) depende de su longitud (L en m) y del valor absoluto de la diferencia algebraica entre las pendientes de las tangentes de aproximación y de salida (A en $\%$), como muestra la Ecuación 2.1 (AASHTO, 2018).

$$K = \frac{L}{|I_1 - I_2|} = \frac{L}{A} \quad , \quad (2.1)$$

Cuando la diferencia de pendientes I_1 e I_2 es elevada, la curvatura de la CVC disminuye, reduciendo la visibilidad disponible para que los conductores puedan circular con seguridad a lo largo de la curva. En estos casos los conductores tienden a reducir su velocidad en la medida que se acercan a la cresta de la CVC (Punto P_3 de la Figura 2.1), para luego incrementarla gradualmente al salir de la cresta de la CVC puesto que disponen de visibilidad suficiente. La magnitud de la reducción de velocidad depende no solamente de la geometría de la curva, sino que también de características individuales del conductor como, por ejemplo, sus habilidades para conducir, sus actitudes o la percepción del riesgo, las cuales definen el comportamiento individual.



2.3 Modelos existentes de velocidad de operación en curvas verticales convexas

La velocidad de operación (V_{85}) corresponde al percentil 85 de la función de distribución de probabilidades (PDF) de velocidades de circulación individuales, medidas en una sección del camino. Depende del trazado (geometría, sección transversal, y visibilidad disponible), de condiciones ambientales (volumen de tráfico, clima y zonas laterales del camino), de las características individuales de los conductores (estado de atención, carga de trabajo y estilo de conducción), de la normativa (leyes de tránsito y fiscalización policial para su cumplimiento) y del vehículo (tipo y condición mecánica).

La Tabla 2.1 muestra los modelos de velocidad de operación de vehículos livianos en condición de flujo libre en términos de la geometría de la CVC. Los modelos de Fambro *et al.* (2000), Fitzpatrick *et al.* (2000) y Jessen *et al.* (2001) estiman V_{85} en el punto de mínima visibilidad, el modelo de García *et al.* (2012) en la mitad de la curva y el de Abbas *et al.* (2012) en la tangente de entrada a la CVC. Los modelos de Fitzpatrick *et al.* (2000) y García *et al.* (2012) muestra una correlación

negativa con la curvatura de la CVC, lo que muestra que a medida que la curva vertical posea una menor curvatura, se reduce la visibilidad disponible y la respuesta de los conductores es una reducción de la velocidad. Por el contrario, los modelos de Fambro *et al.* (2000) y Jessen *et al.* (2001) evidencian que la velocidad de operación no depende de la geometría de la CVC, sino que más bien del flujo y de las regulaciones de operación. Esto se debe a que las pendientes longitudinales de los sitios de medición son suficientemente bajas como para no inducir una respuesta de los conductores al trazado vertical.

Tabla 2.1 Modelos existentes de velocidad de operación en curvas verticales convexas

Autor		Modelo	Rango de variables	Rango de V ₈₅	# sitios de prueba	R ²	Error estándar (km/h)
Fambro <i>et al.</i> (2000)	1	$V_{85} = 72,5 + 0,3V_D$	40<V _D <90	84-100	19	0,48	S/I
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2000)	2	$V_{85} = 105,8 - \frac{149,69}{K}$	5<K≤43	75-102	9	0,60	5,6
	3	$V_{85} = \text{desired speed}$	43<K<60	-	6	-	-
Jessen <i>et al.</i> (2001)	4	$V_{85} = 86,8 + 0,297V_S - 0,639I_1 - 0,00239TMDA$	89<V _S <105 -3,3<I ₁ <4,98 80<TMDA<4086	100-120	62	0,54	3,2
García <i>et al.</i> (2012)	5	$V_{85} = 83,332 - \frac{0,157}{A}$	S/I	S/I	8	0,80	< 2,5
Abbas <i>et al.</i> (2012)	6	$V_{85} = 30,2 + 0,602V_{85,v} + \frac{485}{K}$	76<V _{85,v} <117 30<K<110	80-117	6	0,62	5,6

V₈₅: velocidad de percentil 85 (km/h); V_{85,v}: velocidad de percentil 85 en la mitad de la curva (km/h); V_S: velocidad señalizada (km/h); V_D: velocidad de diseño (km/h); K: curvatura vertical (m/%); A: diferencia algebraica entre pendientes de las tangentes de aproximación y salida (%); I₁: pendiente de tangente de aproximación (%); TMDA: tránsito medio diario anual (veh-día/año); S/I: sin información

Fambro *et al.* (2000), Fitzpatrick *et al.* (2000), Jessen *et al.* (2001), García *et al.* (2012) y Abbas *et al.* (2012) obtuvieron la geometría de los planos de diseño y los datos de velocidad de operación mediante mediciones puntuales. Otros autores han explorado procedimientos de medición alternativos: Echaveguren *et al.* (2015) midieron velocidad de circulación en curvas horizontales mediante seguimiento vehicular con un vehículo equipado con un registrador de datos GPS; Cafiso

et al. (2005) y Cafiso y Cerni (2012) equiparon un vehículo liviano con un registrador de datos GPS y midieron velocidad de operación con un grupo de conductores.

2.4 El estilo de conducción y su efecto en la velocidad de operación

El comportamiento de los conductores consta de las acciones físicas y mentales que realiza durante la tarea de conducción. Depende del contexto de conducción (geometría, tráfico, clima y límites de velocidad) y de sus características individuales (edad, género, experiencia en la conducción y habilidades de conducción) (Sagberg *et al.*, 2015). Este comportamiento define la forma habitual en que un conductor conduce a lo largo del tiempo, exhibiendo patrones de conducta estables. Estos patrones de conducta, denominados por Eleander *et al.* (1993) estilos de conducción, se manifiestan en las decisiones que adopta un conductor durante la conducción, tales como la elección de trayectoria y velocidad.

El estilo de conducción se puede caracterizar mediante métodos objetivos y subjetivos. Los métodos objetivos utilizan datos de telemetría para identificar patrones objetivos de cambios de marcha, aceleraciones, deceleraciones, movimientos del volante, entre otros, a partir de los cuales se pueden inferir estilos de conducción. Estos métodos solo se pueden aplicar cuando se dispone de telemetrías, por lo cual se requiere de un vehículo instrumentado para realizar experimentos en campo o bien simuladores de conducción con más de dos grados de libertad. Los métodos subjetivos provienen de la disciplina de la Psicología del Tráfico y utilizan cuestionarios diseñados especialmente para identificar, mediante procesos estadísticos, los estilos de conducción.

Existen diversos cuestionarios para caracterizar al conductor, tales como el *Driver Behaviour Questionnaire* (Cuestionario de Comportamiento del Conductor; DBQ según sus iniciales en inglés) que evalúa lo que se denomina comportamientos aberrantes, el *Driver Behaviour Inventory* (Inventario de Comportamiento del Conductor; DBI según sus iniciales en inglés) que evalúa la carga de trabajo o estrés durante la conducción y el *Driving Style Questionnaire* (Cuestionario de Estilos de Conducción; DSQ según sus iniciales en inglés) que evalúa la conducción riesgosa. La limitación principal de estos instrumentos es que no evalúa todas las dimensiones del

comportamiento. Para resolver este problema, Taubman-Ben-Ari *et al.* (2004) diseñaron el Inventario Multidimensional de Estilos de Conducción (MDSI según sus iniciales en inglés), el cual permite inferir cualitativamente el estilo de conducción predominante en un individuo. Taubman-Ben-Ari *et al.* (2004) identificaron ocho estilos de conducción que denominaron: riesgoso, alta velocidad, disociativo, ansioso, agresivo, reductor de estrés, paciente y cordial, y prudente.

El MDSI de Taubman-Ben-Ari *et al.* (2004) consiste en un cuestionario con 44 preguntas diseñadas para ambientes de conducción, culturales e idiomáticos específicos, por lo cual debe adaptarse a cada contexto en el que se utiliza. Cada pregunta mide una dimensión diferente, es decir, existen grupos de preguntas que miden un estilo de conducción determinado. El MDSI ha sido adaptado a diversos idiomas para identificar exclusivamente los estilos de conducción (Véase a Poó *et al.*, 2013; Holman y Havarneanu, 2015; Hoof van Huysduynen *et al.*, 2015; Karjanto *et al.*, 2017 y González *et al.*, 2018). La adaptación de González *et al.* (2018) es para el contexto chileno y consta de 28 preguntas validadas.

El MDSI ha sido utilizado principalmente para identificar estilos de conducción y, con excepción del experimento piloto de García (2014), no se ha utilizado para analizar el efecto de los estilos de conducción en la interacción entre velocidad de operación y geometría. García (2014) experimentó con un grupo de seis conductores a los que pidió condujeran como lo hacen habitualmente por un camino de montaña pavimentado de dos pistas por sentido. Midió la velocidad de operación mediante un registrador de datos GPS montado en el vehículo de cada conductor. Determinó que el estilo de conducción influía en la velocidad de circulación experimentada por cada conductor.

2.5 Conclusiones

Las curvas verticales convexas tienen la función de proporcionar cambios graduales de la pendiente longitudinal. La curvatura vertical es el parámetro geométrico que la describe y su concavidad produce pérdida de visibilidad. La pérdida de visibilidad induce reducciones en la velocidad de los

conductores. La magnitud de la reducción de velocidad depende de la magnitud de la pérdida de visibilidad y de la interpretación que el conductor hace de la geometría.

La velocidad de operación depende de las condiciones del trazado, del ambiente, de las características del conductor, de las normas y de las condiciones del vehículo. Existen seis modelos de velocidad de operación en la literatura. Cuatro modelos entregan la velocidad en el punto de mínima distancia de visibilidad, uno en la mitad de la curva vertical y uno en la tangente de entrada. Las variables independientes difieren para cada modelo y se agrupan en dos: variables de diseño (velocidad de diseño, curvatura vertical, pendiente de la tangente de aproximación, velocidad señalizada y diferencia algebraica de pendientes de aproximación y salida) y operacionales (velocidad deseada, tránsito medio diario anual y velocidad de operación en mitad de la curva). Las diferencias en las variables independientes limitan la capacidad de comparación de los modelos.

Todos los modelos utilizan técnicas de medición puntual (por ejemplo, pistola laser) y ninguno caracteriza al conductor. Existen técnicas alternativas de medición, donde destaca la medición continua con un registrador de datos GPS instalado en vehículos de prueba.

El comportamiento de los conductores corresponde a todas las acciones que realizan durante la conducción y varía de acuerdo a las características del camino y sus características personales. El estilo de conducción caracteriza el comportamiento del conductor ya que incorpora las características personales y sus decisiones durante la conducción.

El MDSI es un instrumento que permite identificar estilos de conducción y ha sido adaptado al español para Chile. Es sencillo de utilizar, económico e integra todas las dimensiones del comportamiento del conductor. El MDSI no se ha utilizado para analizar el efecto de los estilos de conducción en la velocidad de operación. Si se utiliza un grupo de conductores caracterizados por el MDSI y se realiza medición continua con un registrador de datos GPS, es posible estudiar el efecto velocidad-geometría-estilo de conducción.

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN

3.1 Introducción

En este capítulo se determina el procedimiento sistemático de calibración del modelo de velocidad de operación. Se presenta el modelo conceptual, se formula el modelo con el que se determinan las variables de interés y se calcula el tamaño muestral mínimo.

3.2 Procedimiento de calibración del modelo

El procedimiento sistematiza la calibración y consta de cuatro etapas (Figura 3.1). En el (1) diseño experimental se formula el modelo, se determinan las variables de interés y se estima el tamaño de la muestra mínima requerida. En las (2) mediciones de datos de terreno se desarrollan los procedimientos de selección de CVC, de medición de datos de terreno y de selección de conductores. Se realizan las mediciones de datos de terreno y obtienen los datos para la extracción de la geometría, la obtención de la velocidad y la caracterización de los conductores. En la (3) conformación de la base de datos se extrae la geometría de las CVC, se calcula la velocidad de circulación de los conductores y se obtienen sus estilos de conducción. Con la geometría de las CVC, la velocidad de circulación de los conductores y sus estilos de conducción se realiza un análisis de patrones y se configura la base de datos para la modelación. Por último, en el (4) desarrollo de los modelos se calibran y validan los modelos de velocidad de operación.

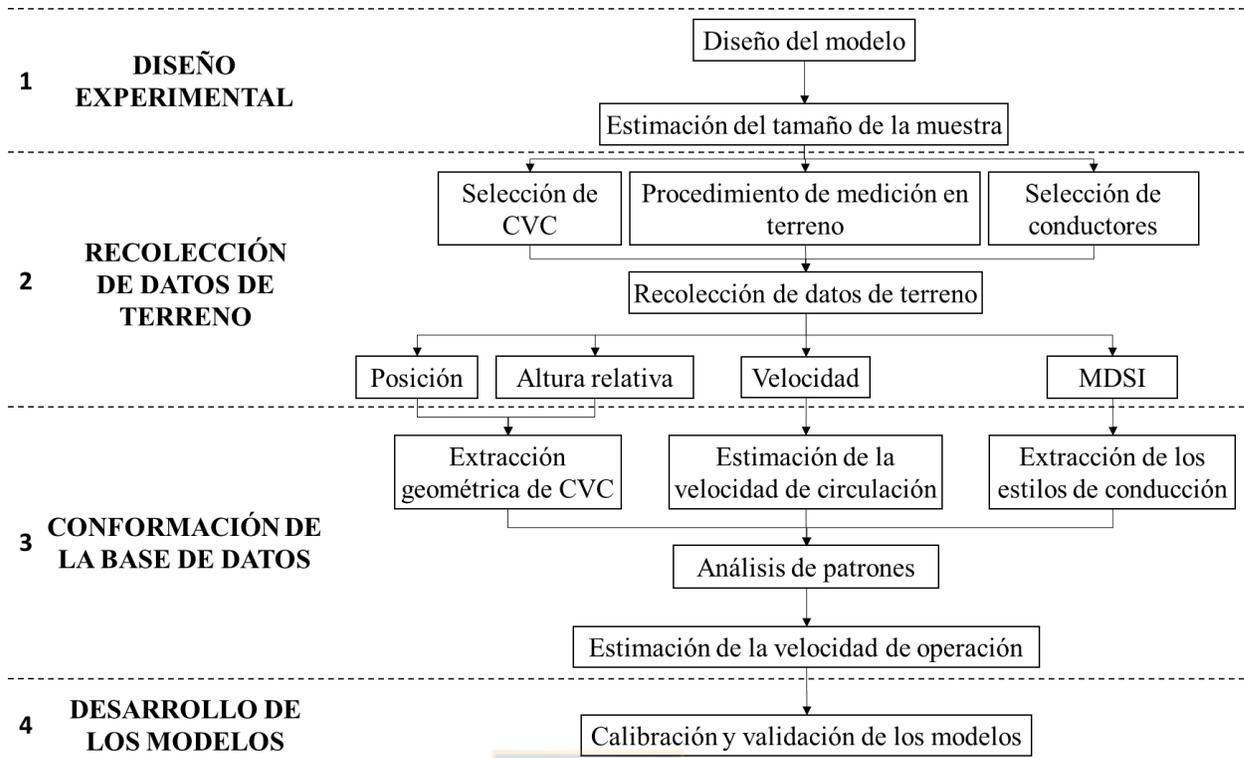


Figura 3.1 Procedimiento de calibración del modelo de velocidad de operación en CVC

3.3 El modelo conceptual

El contexto de conducción corresponde a la combinación de la geometría del camino (geometría longitudinal, visibilidad y sección transversal) y su ambiente (tráfico, zonas laterales, clima y fiscalización policial). En un contexto de conducción determinado, los conductores eligen diferentes velocidades, ya que interpretan la geometría y el ambiente motivados por sus características personales. Por lo tanto, los conductores eligen su velocidad según sus características personales y actitudinales (estilo de conducción) y su contexto de conducción (experiencia previa del trazado y la geometría que se le presenta a continuación). La Figura 3.2 muestra el modelo conceptual. En la parte (a) se muestran los factores que inciden en la elección de la velocidad y trayectoria de los conductores. En la parte (b) se muestra que en un punto P_1 de una CVC distintos conductores adoptan velocidades diferentes según su estilo de conducción. Un grupo de conductores con estilos de conducción DS_1 y DS_2 , escogen velocidades de operación

($V_{85,DS1}$ y $V_{85,DS2}$) diferentes. Por lo tanto, en cada punto de la CVC se obtienen PDF de velocidad de operación diferente.

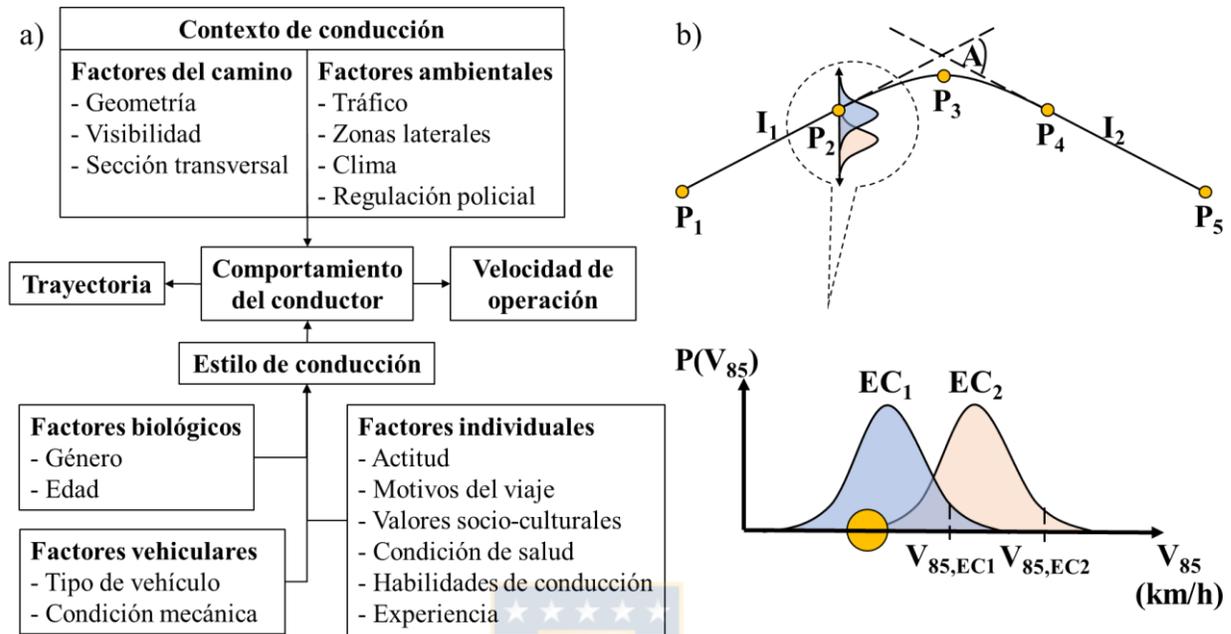


Figura 3.2 Modelo conceptual de velocidad de operación

3.4 Formulación del modelo a calibrar

El modelo a desarrollar explica el efecto de la curvatura vertical (K) y el estilo de conducción (DS_i) de cada conductor sobre la velocidad en un punto P_i de la CVC. En la modelación se asumieron como condiciones fijas la sección transversal de la carretera; todos los factores ambientales y todos los factores del vehículo (Ver Figura 3.2). Los factores geometría y visibilidad se consideraron en la curvatura vertical y los factores individuales en los estilos de conducción. No se incluyó la trayectoria seguida por el vehículo dado que se consideraron curvas verticales en rectas y anchos de pista fijos, de modo de limitar al máximo la variabilidad de la trayectoria.

La curvatura vertical se clasificó en los niveles “baja” ($K \leq 40$ m/%) y “alta” ($K > 40$ m/%), en tanto que los estilos de conducción se clasificaron de acuerdo a González *et al.* (2018) en: prudente, reducción de estrés, disociativo, ansioso, agresivo y riesgo y alta velocidad.

3.5 Estimación del tamaño de la muestra

Una muestra corresponde a un conductor que circuló una vez por un sitio de prueba. Un sitio de prueba es una agrupación de una o varias CVC de características geométricas similares. Con la clasificación de las variables independientes, el tamaño de la muestra se calculó usando el método de análisis de potencia estadística, considerando una evaluación a priori del Test F con interacción total de variables independientes (Cohen, 1988). Para un efecto tamaño medio ($f^2 = 0,25$), una potencia estadística del 95 % y confiabilidad estadística del 95 %, se requiere un total de 323 muestras divididas en 27 repeticiones para cada combinación de curvatura vertical y estilo de conducción. Esto se traduce en diversas combinaciones de conductores y curvas verticales. Por ejemplo, tres curvas verticales en cada categoría y nueve conductores en una categoría de estilos de conducción arrojan 27 repeticiones.

3.6 Conclusiones



Se desarrolló un procedimiento sistemático de calibración que involucra cuatro etapas: el diseño experimental, la recolección de datos de terreno, la conformación de la base de datos y la modelación de la velocidad de operación. El procedimiento permite ordenar el desarrollo del trabajo y modificar sub-etapas sin afectar el procedimiento general. Por ejemplo, utilizar procedimientos alternativos de restitución geométrica u otro instrumento de identificación de estilos de conducción.

Se formuló el modelo que incorpora el factor humano en la modelación de la velocidad de operación. Las variables consideradas fueron la curvatura vertical y el estilo de conducción. Se consideraron dos rangos para la curvatura vertical (baja y alta) y seis estilos de conducción (prudente, reducción de estrés, disociativo, ansioso, agresivo y riesgo y alta velocidad).

El tamaño muestral mínimo fue de 323 muestras divididas en 27 repeticiones para cada combinación de variables independientes. Las repeticiones se pueden conseguir con diversas combinaciones de

conductores y CVC. Por ejemplo, tres curvas verticales en cada categoría y nueve conductores en un estilo de conducción arrojan las 27 repeticiones necesarias.



CAPÍTULO 4 OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN EN TERRENO

4.1 Introducción

En este capítulo se determina el procedimiento de recolección de datos de terreno. Se describe el procedimiento y los criterios de selección de curvas verticales convexas, de selección de conductores y de medición de los datos en terreno.

4.2 Selección de curvas verticales convexas

La selección de las CVC se realizó en tres pasos: preselección en gabinete, mediciones exploratorias de terreno y post-procesamiento y selección final en gabinete. Primero, con imágenes satelitales se identificaron caminos bidireccionales pavimentados en la región del Biobío, sin elementos que fuesen a interferir con las señales del registrador de datos GPS (torres de alta tensión o bosques densos) y, de los registros de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile, se eligieron aquellos con un volumen de tráfico menor a 5000 vehículos/día-año. Segundo, se realizaron mediciones exploratorias en terreno usando un registrador de datos GPS con cámara de video, donde se filmó el camino longitudinalmente, la sección transversal y las zonas laterales. Se midió el ancho de la calzada (pistas y bermas), se auscultó el estado del pavimento y se inspeccionó visualmente las zonas laterales. Tercero, se revisaron las grabaciones de video, los registros de medición, auscultación e inspección visual y se seleccionaron los caminos con pistas de 3,5 m de ancho y pavimento en buen estado, berma mínima de 1 m de ancho, sin restricción lateral y con espacio suficiente para realizar maniobras de detención, giro, inicio y detención del vehículo de prueba. Se seleccionaron 40 CVC sin superposición con curvas horizontales, sin presencia de intersecciones, entradas a recintos privados o infraestructuras que afectaran la conducción y sin señalización, límites de velocidad y/o paraderos de locomoción colectiva. La Figura 4.1 muestra la ubicación de los caminos y el número de CVC seleccionadas.

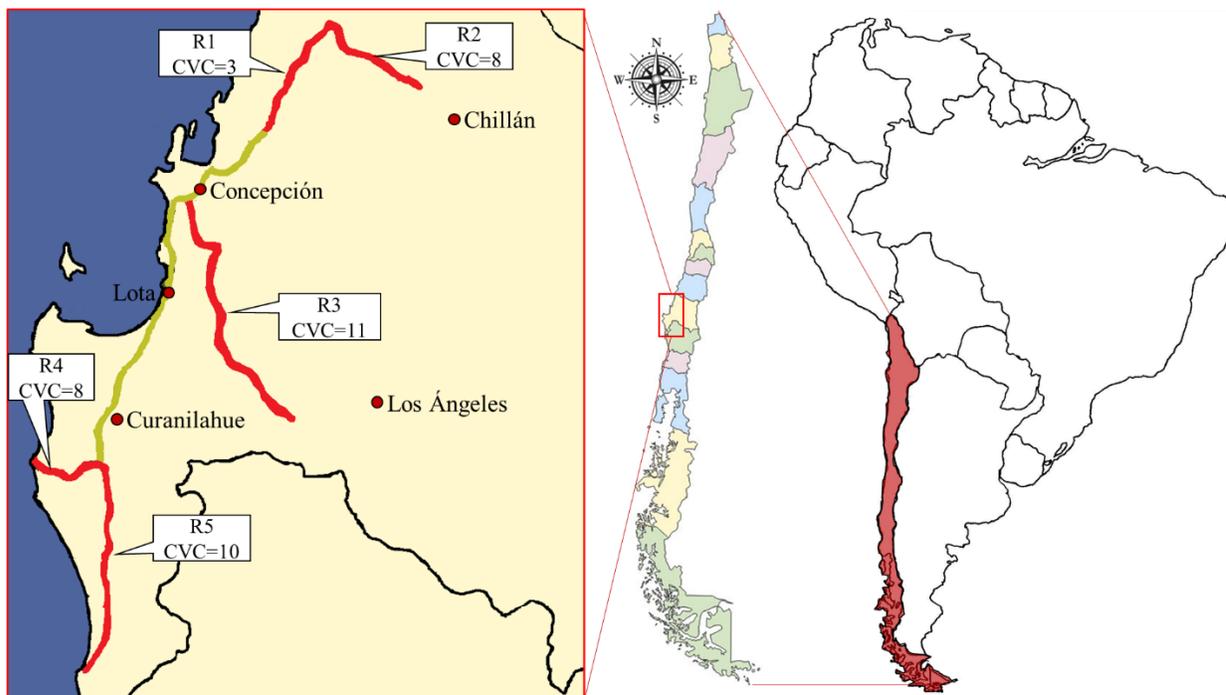


Figura 4.1 CVC seleccionadas para medición de velocidad

4.3 Selección de conductores

La selección de los conductores involucró los siguientes criterios: condición física, experiencia en la conducción, lugar de residencia y condiciones del vehículo. Cada criterio constituyó un paso diferente en el proceso de selección. Para que un conductor fuera seleccionado debía cumplir con todos los criterios de selección. Los criterios de selección buscaron eliminar comportamientos o condiciones anómalos que influyeran o sesgaran la elección de velocidad de los conductores.

Primero, se seleccionaron conductores con edad entre 18 y 45 años, hombre o mujer y sin problemas de salud. Segundo, se seleccionaron aquellos conductores que condujeran regularmente por caminos bidireccionales, más de una vez por semana en los últimos tres meses. Tercero, se seleccionaron aquellos conductores que residieran cerca de la ciudad de Concepción para no producir fatiga por exceso de tiempo de conducción en las mediciones de datos de terreno. Por último, se seleccionaron aquellos conductores que tuvieran un vehículo liviano en buenas condiciones mecánicas y de menos de 10 años de antigüedad. Este criterio, además de disminuir la

variabilidad mecánica de los vehículos, buscó minimizar los errores o situaciones imprevisibles por falta de acostumbramiento de los conductores. Se seleccionó un grupo de 16 conductores con edades entre 23 y 43 años. 14 conductores fueron hombres y 2 fueron mujeres.

4.4 Mediciones de terreno

A cada conductor seleccionado se le aplicó el MDSI de González *et al.* (2018) previo a las mediciones de velocidad. Se realizaron las mediciones de velocidad en condición diurna y con buen tiempo atmosférico. Los 16 conductores fueron acompañados por un operador, el que los instó a conducir como lo harían habitualmente por un camino bidireccional. Los conductores circularon por cada CVC una vez por cada dirección de tránsito. Se descartó la medición de una CVC cada vez que el conductor modificó su velocidad por maniobras de detención, adelantamiento, seguimiento de un vehículo más lento, obstáculos en el camino o por situaciones anómalas ocurridas dentro del habitáculo del vehículo. No se repitieron las mediciones descartadas.

Los datos de posición, velocidad y altura longitudinal se obtuvieron con un registrador de datos GPS de 10 Hz instalado en cada vehículo de prueba. El registrador de datos GPS tiene una precisión de velocidad de 0,2 km/h y de distancia de 0,05% y obtiene los datos con un mínimo de cuatro satélites y un máximo de ocho (Racelogic, 2008).

4.5 Conclusiones

La medición de datos de terreno busca obtener la velocidad de circulación de un grupo de conductores por curvas verticales convexas con características geométricas y operacionales determinadas. Sin embargo, el procedimiento de selección es independiente.

Se seleccionaron 40 CVC de caminos bidireccionales sin superposición con curvas horizontales, con ancho de pista de 3,5 m y bermas de 1 m de ancho, con espacio suficiente para realizar maniobras de giro y/o detención de los vehículos, sin intersecciones, entradas a recintos privados,

sin señalización, límites de velocidad y/o paraderos de locomoción colectiva. Estos criterios de selección permitieron fijar variables geométricas y operacionales, haciendo variar la geometría a través de la curvatura vertical.

Se seleccionaron 16 conductores con edades entre 23 y 43 años. Los requisitos de selección buscaron eliminar comportamientos anómalos que sesgaran la elección de velocidad y fueron la condición física saludable, la experiencia en caminos bidireccionales, el lugar de residencia cercano a la ciudad de Concepción y que tuvieran un vehículo con una antigüedad menor a 10 años.

La medición de datos de terreno involucró la aplicación a cada conductor del MDSI y las mediciones de velocidad en terreno.



CAPÍTULO 5 CONFORMACIÓN DE LA BASE DE DATOS

5.1 Introducción

En este capítulo se desarrollan la configuración de la base de datos para modelar. Se describe el procedimiento de obtención y agrupación de la geometría de las CVC, de obtención de la velocidad de circulación de cada conductor, de obtención del estilo de conducción de cada conductor, el análisis de las relaciones entre la velocidad de circulación y la geometría y, por último, la obtención de la velocidad de operación.

5.2 Obtención de la geometría de las curvas verticales convexas

La obtención de la geometría se realizó en los tres pasos que se muestran en la Figura 5.1. Primero, con los datos de posición y altura longitudinal relativa extraídos del registrador de datos GPS, se elaboró para cada CVC un diagrama de pendientes. Cada punto mostrado en el paso 1 representa la pendiente calculada en un punto de la CVC por cada conductor.

Segundo, las pendientes calculadas se suavizaron usando el suavizador exponencial simple para eliminar datos anómalos y condensarlos. Se identificó el inicio y fin de la curva (P_2 y P_4) y de la tangente de aproximación (P_1 y P_2) y salida (P_4 y P_5).

Tercero, se calculó la pendiente longitudinal constante de cada tangente (I_1 e I_2) como el promedio de las pendientes suavizadas. Se ajustó una regresión lineal de las pendientes suavizadas para el tramo de la CVC. Se recalculó el inicio y fin de la CVC ingresando I_1 e I_2 , respectivamente, en la regresión lineal. Por último, se calculó el largo de la tangente de entrada (L_1) como la diferencia de P_2 y P_1 , el largo de la CVC como la diferencia de P_4 y P_2 y el largo de la tangente de salida como la diferencia de P_5 y P_4 . Con estos datos y usando la Ecuación 2.1, se calculó el parámetro de curvatura vertical de las CVC.

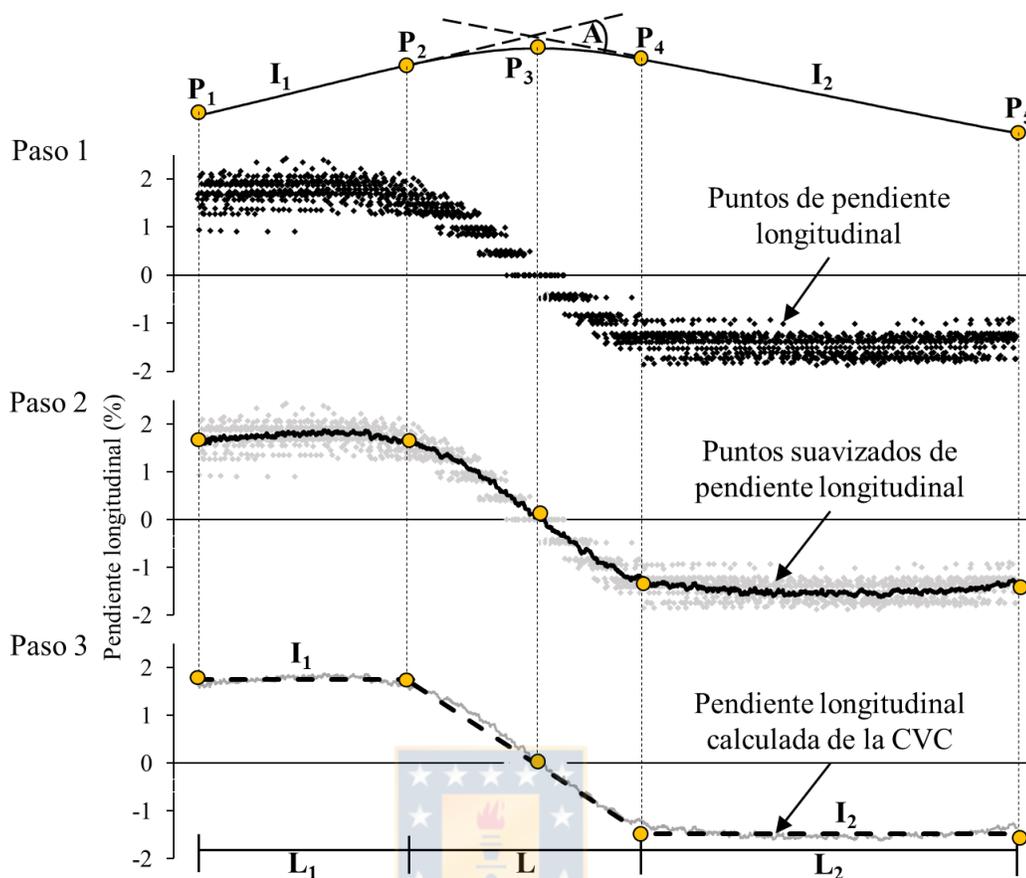


Figura 5.1 Obtención de la geometría usando diagramas de pendiente de una CVC

5.3 Agrupación de curvas verticales convexas

Se realizó un análisis de conglomerado de observaciones para agrupar CVC con características similares. Cada agrupación de curvas corresponde a un sitio de prueba. Se identificaron 10 conglomerados (sitios de prueba) para el rango de curvaturas encontradas en las mediciones de terreno.

La Tabla 5.1 muestra los parámetros geométricos de las CVC, que incluyen la pendiente de la tangente de aproximación, el largo de la tangente de aproximación, el largo de la curva vertical, la pendiente de la tangente de salida, el largo de la tangente de salida, la diferencia algebraica entre las pendientes de aproximación y de salida, y la curvatura vertical de las 40 CVC, agrupadas en 10 sitios de prueba disponibles para la calibración y validación.

Tabla 5.1 Parámetros geométricos de las CVC

Sitio de prueba	# de CVC	I ₁ (%)	L ₁ (m)	L (m)	I ₂ (%)	L ₂ (m)	A (%)	K (m/%)	
								CVC	Grupo de CVC
1	1	7,8	66,6	179,2	-1,8	187,0	9,6	18,7	18,7
	2	1,8	187,0	179,2	-7,8	66,6	9,6	18,7	
2	3	2,4	94,7	134,8	-3,4	120,7	5,8	23,4	23,7
	4	3,4	42,1	134,8	-2,4	94,7	5,8	23,4	
	5	3,0	231,8	188,4	-5,0	32,4	8,0	23,7	
	6	5,0	32,4	188,4	-3,0	231,8	8,0	23,7	
	7	3,5	66,1	167,0	-3,5	147,2	7,0	23,7	
	8	3,5	147,2	167,0	-3,5	66,1	7,0	23,7	
	9	0,7	46,8	88,5	-2,9	24,8	3,6	24,5	
	10	2,9	24,8	88,5	-0,7	46,8	3,6	24,5	
3	11	1,1	143,3	121,8	-3,1	90,4	4,3	28,6	28,6
	12	3,1	90,4	121,8	-1,1	143,3	4,3	28,6	
4	13	1,7	87,0	97,8	-1,5	155,5	3,2	30,4	30,6
	14	1,5	155,5	97,8	-1,7	87,0	3,2	30,4	
	15	2,9	48,9	134,1	-1,4	157,5	4,3	31,1	
5	16	3,9	71,1	173,4	-1,3	156,0	5,2	33,1	34,3
	17	1,3	156,0	173,4	-3,9	71,1	5,2	33,1	
	18	0,9	145,5	102,5	-2,2	128,0	3,1	33,4	
	19	2,2	128,0	102,5	-0,9	145,5	3,1	33,4	
	20	2,6	212,3	139,6	-1,4	125,6	4,0	34,6	
	21	1,4	125,6	139,6	-2,6	212,3	4,0	34,6	
	22	4,1	55,1	241,5	-2,7	103,8	6,7	35,8	
	23	2,7	103,8	241,5	-4,1	55,1	6,7	35,8	
6	24	3,1	83,9	171,9	-1,4	127,1	4,5	38,3	38,3
	25	1,4	127,1	171,9	-3,1	83,9	4,5	38,3	
7	26	0,6	274,4	93,3	-1,6	52,8	2,3	41,2	43,1
	27	1,6	52,8	93,3	-0,6	274,4	2,3	41,2	
	28	2,1	42,6	142,9	-1,3	45,5	3,3	42,7	
	29	1,3	45,5	142,9	-2,1	42,6	3,3	42,7	
	30	0,7	69,1	129,3	-2,3	52,0	3,0	43,5	
	31	2,7	129,8	174,7	-1,2	245,9	3,9	44,6	
	32	1,2	245,9	174,7	-2,7	129,8	3,9	44,6	
	8	33	1,8	163,9	107,8	-0,4	208,7	2,2	
34		0,4	208,7	107,8	-1,8	163,9	2,2	48,1	
9	35	0,5	93,7	224,7	-3,5	42,1	4,0	56,8	57,1
	36	3,5	102,2	224,7	-0,5	93,7	4,0	56,8	
	37	0,8	153,7	182,7	-2,4	93,7	3,2	57,1	
	38	2,4	93,7	182,7	-0,8	153,7	3,2	57,1	
10	39	1,2	144,2	113,8	-0,6	132,0	1,8	63,7	63,7
	40	0,6	132,0	113,8	-1,2	144,2	1,8	63,7	

5.4 Obtención de la velocidad de circulación por conductor

La velocidad de circulación es individual para cada conductor y corresponde a la velocidad en un punto P_i de la CVC. El registrador de datos GPS utilizado permite obtener datos de velocidad instantánea cada 0,1 s. Para calcular la velocidad de circulación del conductor se agruparon los datos de velocidad obtenidos con el registrador de datos GPS alrededor de cada punto característico de la curva, tomando un conjunto suficiente de puntos de velocidad que minimicen la varianza. Se determinó que, con cinco puntos de velocidad a izquierda y derecha del punto característico, la varianza resultaba inferior a 1,5 km/h. De este modo, se obtuvieron velocidades de circulación de cada conductor en los puntos P_1 a P_4 de la CVC.

De este modo se obtuvieron en total 14520 datos de velocidad, 3630 datos por cada punto P_i . En cada CVC la cantidad de datos varió entre 22 y 143, en tanto que en cada grupo de CVC varió entre 99 y 957. En las Figura 5.2 a la Figura 5.5 se muestran los datos crudos de velocidad en los cuatro puntos de la CVC para diferentes curvaturas verticales y todos los conductores.

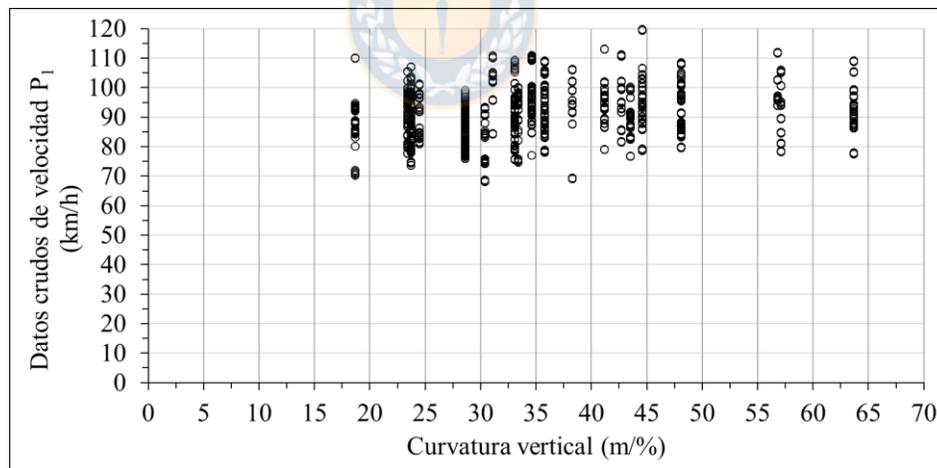


Figura 5.2. Datos crudos de velocidad en el punto P_1

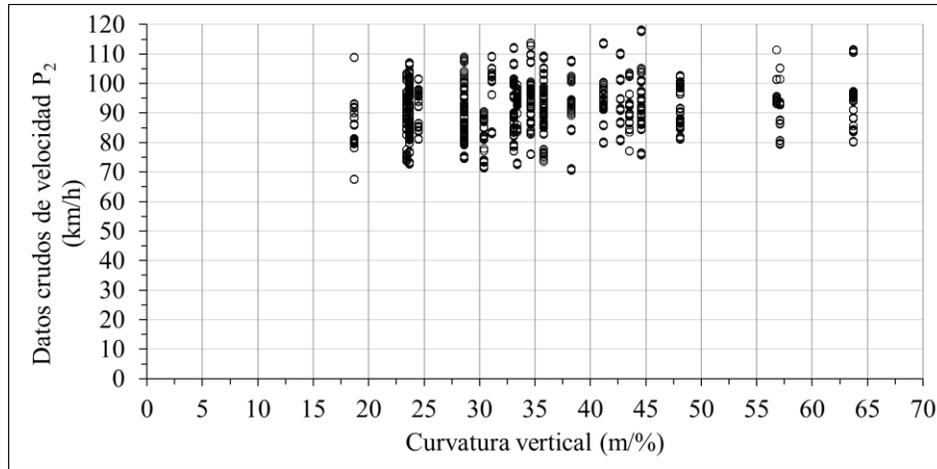


Figura 5.3. Datos crudos de velocidad en el punto P₂

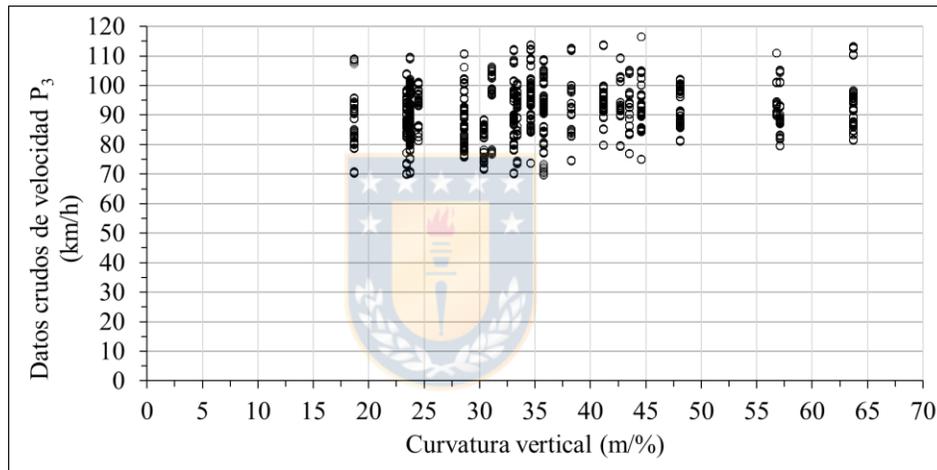


Figura 5.4. Datos crudos de velocidad en el punto P₃

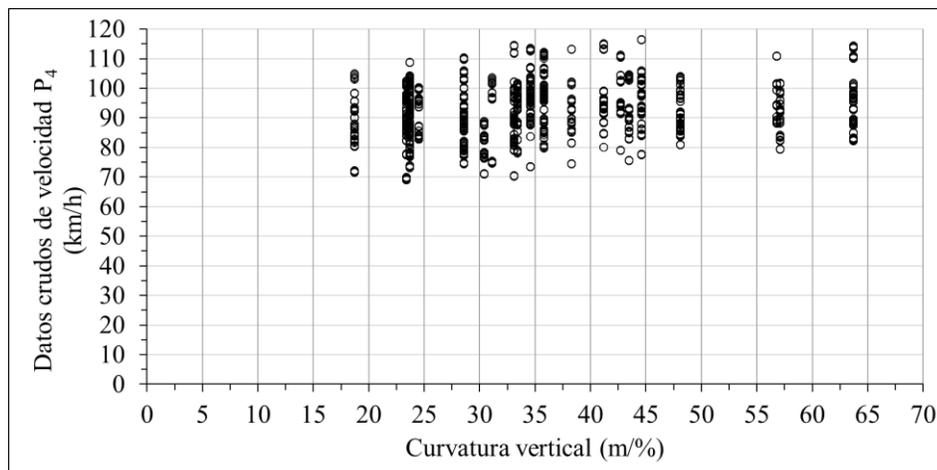


Figura 5.5. Datos crudos de velocidad en el punto P₄

5.5 Clasificación de los conductores según estilos de conducción

A partir del MDSI los conductores fueron clasificados en cinco estilos de conducción: uno con el estilo de conducción prudente, cuatro con ansioso, dos con reducción de estrés, tres con agresivo y seis con riesgo y alta velocidad. Posteriormente, se identificaron posibles diferencias estadísticamente significativas en la velocidad media de circulación respecto de cada estilo de conducción. Los resultados se muestran en la Tabla 5.2. Se determinó que los estilos de conducción prudente y ansioso no exhibían diferencias significativas en la velocidad media. Lo mismo se detectó para los estilos de conducción agresivo, riesgo y alta velocidad y reducción de estrés. Por tanto, los estilos de conducción se clasificaron en los dos grupos (DS_1 y DS_2) mostrados en la Tabla 5.2. Esta clasificación consideró las velocidades de circulación en las 40 CVC de la Tabla 5.1.

Tabla 5.2 Grupos de estilos de conducción según la velocidad de circulación de cada conductor

Grupo	Estilo de conducción	# de datos de velocidad	Velocidad de circulación media (km/h)	Desviación estándar (km/h)	valor-p
DS_1	Prudente	37	85,9	7,1	0,00
	Ansioso	107	87,9	8,7	0,00
DS_2	Agresivo	56	92,2	6,7	0,00
	Riesgo y alta velocidad	128	94,7	9,0	0,00
	Reducción de estrés	29	94,8	7,3	0,00

5.6 Relación entre la velocidad de circulación y la geometría de la curva

Se aplicó un test de diferencia de medias para las velocidades en cuatro puntos de la CVC (P_1 , P_2 , P_3 y P_4). No hubo diferencias estadísticamente significativas, es decir, los conductores no variaron su velocidad a medida que circularon por la CVC. En la Tabla 5.3 se muestra la diferencia de velocidad de circulación por punto de la CVC. En paréntesis se muestra la desviación estándar (km/h) de cada velocidad de circulación media.

Tabla 5.3 Diferencia de velocidad de circulación por punto de la CVC

Grupo de conductores	# de datos de velocidad de circulación	Velocidad de circulación media (km/h)				valor-p
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
Todos los conductores	357	91,5 (8,9)	91,3 (8,9)	91,3 (8,9)	92,3 (9,0)	0,45
DS ₁	144	87,1 (8,1)	86,8 (8,1)	86,8 (8,2)	87,8 (8,2)	0,73
DS ₂	213	94,4 (8,3)	94,3 (8,1)	94,3 (8,1)	95,3 (8,3)	0,60

Se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson entre las velocidades de circulación de cada grupo de conductores y los parámetros geométricos. El inverso de la curvatura (1/K) mostró una correlación negativa estadísticamente significativa con la velocidad para cada grupo de conductores: una correlación de -0,43 para todos los conductores, una correlación de -0,31 para el DS₁ y una correlación de -0,35 para el DS₂. En la Tabla 5.4 se muestra la correlación lineal de Pearson y en paréntesis su valor-p.

Tabla 5.4 Correlación lineal de Pearson con la velocidad de circulación por grupo de conductores

Parámetro geométrico	Grupo de conductores		
	Todos los conductores	DS ₁	DS ₂
I1	-0,25 (0,12)	-0,28 (0,10)	-0,23 (0,16)
L1	0,05 (0,78)	0,14 (0,43)	0,17 (0,31)
L	0,14 (0,38)	-0,05 (0,77)	0,10 (0,55)
I2	0,11 (0,51)	0,08 (0,63)	0,03 (0,88)
L2	-0,01 (0,96)	0,08 (0,67)	0,01 (0,96)
A	-0,26 (0,11)	-0,25 (0,14)	-0,19 (0,26)
K	0,39 (0,01)	0,25 (0,14)	0,29 (0,08)
1/I1	0,29 (0,07)	0,23 (0,19)	0,20 (0,22)
1/L1	0,04 (0,82)	0,09 (0,60)	-0,15 (0,36)
1/L	-0,13 (0,43)	0,04 (0,80)	-0,13 (0,44)
1/I2	-0,08 (0,62)	-0,12 (0,48)	0,06 (0,73)
1/L2	0,05 (0,74)	0,09 (0,62)	-0,08 (0,65)
1/A	0,20 (0,22)	0,20 (0,24)	0,17 (0,30)
1/K	-0,43 (0,01)	-0,31 (0,07)	-0,35 (0,03)

5.7 Estimación de la velocidad de operación

La agrupación de las CVC en sitios de prueba y las relaciones entre la geometría, la velocidad de circulación y los estilos de conducción, evidencian la necesidad de calibrar modelos por grupo de conductores, ya que existen diferencias de velocidad de circulación estadísticamente significativas. Sin embargo, se debe calibrar un modelo único para la CVC, ya que no existieron diferencias de velocidad de circulación entre puntos sucesivos del alineamiento. La curvatura vertical es el parámetro geométrico que engloba todas las partes de la CVC y, además, su inverso ($1/K$) fue el más correlacionado con la velocidad.

Por esto, la velocidad de operación se calculó para cada sitio de prueba y para cada grupo de conductores en el punto de altura máxima de la curva (P_3). Se utilizaron 11 datos de velocidad en la vecindad del punto P_3 por cada conductor que circuló por cada CVC del sitio de prueba. Para configurar la base de datos se realizó un muestreo aleatorio simple con el fin de obtener las CVC que formaron parte de cada sitio de prueba. Con el 80% de los datos se configuró la base de datos para calibrar y el 20% restante se dejó para validar. La base de datos del grupo de todos los conductores se configuró con 32 CVC, del grupo DS_1 con 29 CVC y del grupo DS_2 con 30 CVC. Para el DS_2 no se utilizó el sitio de prueba número 1 por falta de muestras. La Tabla 5.5 resume la cantidad de datos de velocidad utilizados y la velocidad del percentil 85 de cada sitio de prueba en cada grupo de conductores.

Tabla 5.5 Base de datos de la velocidad del percentil 85 para calibrar

Sitio de prueba	# de CVC	Todos los conductores		DS ₁		DS ₂	
		# de datos de velocidad	V _{85,TC} (km/h)	# de datos de velocidad	V _{85,DS1} (km/h)	# de datos de velocidad	V _{85,DS2} (km/h)
1	2	143	97,1	66	90,6	-	-
2	8	572	97,3	220	95,7	363	99,2
3	2	264	98,9	110	93,4	154	101,8
4	3	198	97,3	88	88,1	110	98,6
5	8	682	103,5	286	94,5	440	105,3
6	2	99	103,1	44	94,8	55	105,2
7	7	363	101,8	176	96,2	209	102,5
8	2	198	98,5	66	95,9	132	99,8
9	4	132	99,4	22	90,0	88	96,1
10	2	187	101,4	66	88,5	121	104,2

5.8 Conclusiones

La utilización del registrador de GPS permitió desarrollar un procedimiento de obtención de la geometría con los datos de altura relativa y distancia longitudinal en base al diagrama de pendiente. La confiabilidad de la estimación está dada principalmente por las repeticiones (pasadas de cada conductor) por las CVC.

Se obtuvo la velocidad de circulación y estilo de conducción de cada conductor. La velocidad de circulación se obtuvo en cuatro puntos de la CVC (P_1 , P_2 , P_3 y P_4). La velocidad de circulación fue estadísticamente diferente en dos grupos de estilos de conducción. El grupo 1 quedó conformado por los estilos de conducción prudente y ansioso y el grupo 2 por los estilos de conducción agresivo, reducción de estrés y riesgo y alta velocidad. La velocidad no varió entre los diferentes puntos de la CVC. Se determinó que la variable geométrica más correlacionada con la velocidad de circulación es el inverso de la curvatura vertical. Por lo tanto, se estimó la velocidad de operación en el punto P_3 de los sitios de prueba para cada grupo de estilos de conducción.



CAPÍTULO 6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN

6.1 Introducción

En este capítulo se calibran y validan los modelos de velocidad de operación. Por último, se analizan los resultados y se comparan con los modelos disponibles en la literatura.

6.2 Calibración de los modelos de velocidad de operación

Se calibró un modelo de velocidad de operación por grupo de conductores. Los modelos de la Tabla 6.1 representan la velocidad de operación para un grupo de conductores en el punto de altura máxima de la CVC (P₃). El valor t se presenta en paréntesis. Las ecuaciones de la Tabla 6.1 son válidas para valores de K entre 18 y 66 m/%. Se puede apreciar que los coeficientes de correlación de los tres modelos son superiores a 0,6. Asimismo, el error estándar resultó inferior a 1,6 km/h lo cual se considera satisfactorio.

Tabla 6.1 Modelos calibrados para cada grupo de conductores

Grupo de conductores	Modelo	R ²	ajR ²	S (km/h)
Todos los conductores	$V_{85,TC} = 101,289 - \frac{87,460}{K}$ (99,4) (-2,9)	0,63	0,55	1,04
DS ₁	$V_{85,DS1} = 99,556 - \frac{170,370}{K}$ (224,1) (-12,7)	0,98	0,97	0,36
DS ₂	$V_{85,DS2} = 107,772 - \frac{182,710}{K}$ (47,9) (-2,4)	0,66	0,55	1,56

V_{85,TC}: velocidad del percentil 85 para todos los conductores (km/h); V_{85,DS1}: velocidad del percentil 85 para el grupo DS₁ (km/h); V_{85,DS2}: velocidad del percentil 85 para el grupo DS₂ (km/h).

La Figura 6.1 muestra el modelo de velocidad de operación de cada grupo de conductores en términos de la curvatura vertical. Se destaca en gris la velocidad menor a 50 km/h en todo el rango de curvatura vertical. Estas velocidades son características de caminos de bajo estándar o de

condiciones de tráfico diferentes, por lo que el comportamiento es diferente y no es considerado en este trabajo.

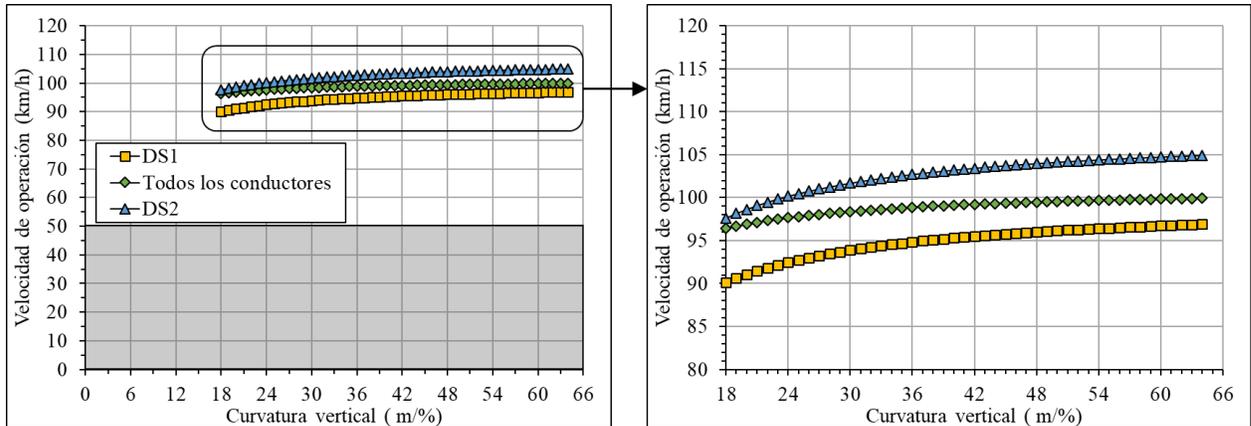


Figura 6.1. Modelos de velocidad de operación

6.3 Validación de los modelos de velocidad de operación

La validación se realizó con el 20% de los datos. La Figura 6.2 muestra la validación de los modelos de velocidad de operación para los tres grupos de conductores. El sombreado gris se interpreta igual que en la Figura 6.1. Se puede apreciar que los modelos predicen de manera razonable la velocidad de operación estimadas a partir de las velocidades de circulación de los grupos de conductores.

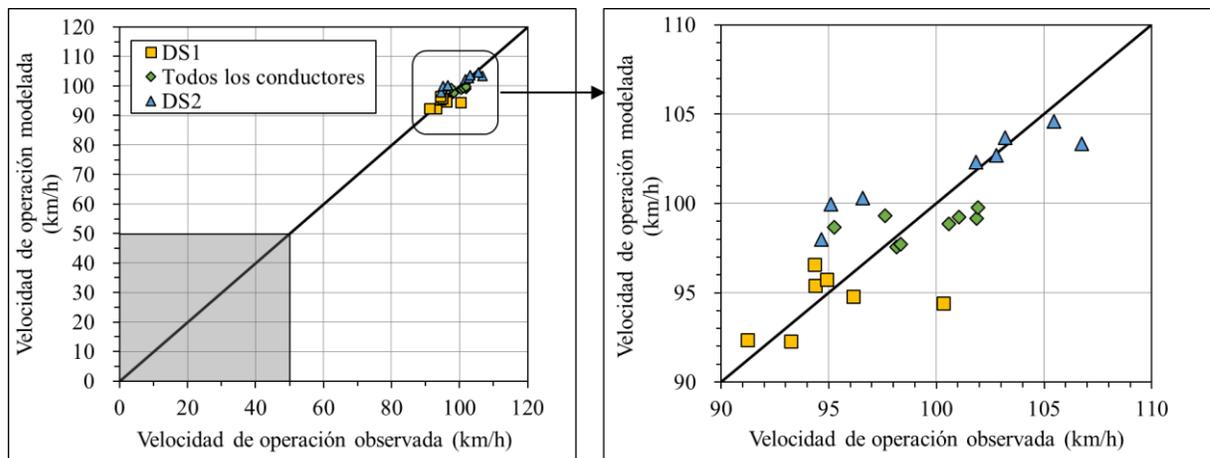


Figura 6.2. Velocidad de operación observada y modelada por grupo de conductores

La Figura 6.3 muestra el error cuadrático medio (RMS) de las CVC usadas en la validación y de los modelos calibrados. El error estándar de las curvas usadas en la validación está entre 0,1 y 5,9 km/h. El RMS del modelo del grupo DS₁ es de 2,6 km/h, del modelo de todos los conductores de 2,0 km/h y del modelo del grupo DS₂ de 2,8 km/h. En conclusión, se aprecia que los modelos validados predicen de manera razonable la velocidad de operación estimadas a partir de las velocidades de circulación de los grupos de conductores, con un RMS menor a 2,8 km/h.

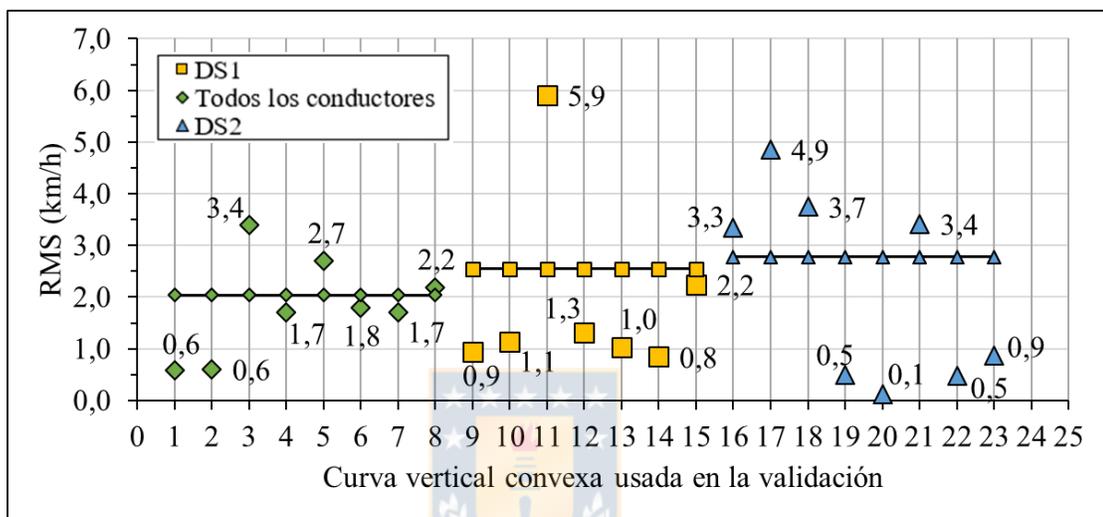


Figura 6.3. Error cuadrático medio de la velocidad de percentil 85 observada respecto a la medida

6.4 Análisis de los modelos de velocidad de operación calibrados

Se realizó un test de igualdad de media de las predicciones de velocidad de operación entre los tres modelos calibrados. Los tres modelos son estadísticamente diferentes y sus diferencias de velocidad se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Diferencias de velocidad de operación entre los modelos calibrados

Grupo de conductores	V ₈₅ promedio (km/h)	Diferencias de velocidad de operación entre los modelos calibrados (km/h)					
		Mín. DS ₁	Media DS ₁	Máx. DS ₁	Mín. DS ₂	Media DS ₂	Máx. DS ₂
Todos los conductores	98,9	3,0	4,1	6,3	1,2	3,8	5,0
DS ₁	94,8	-	-	-	7,5	7,9	8,0
DS ₂	102,7	-	-	-	-	-	-

La Figura 6.4 muestra los modelos calibrados y validados en comparación con el modelo de Fitzpatrick *et al.* (2000). No se cotejaron los modelos de la Tabla 6.1 con los otros modelos disponible en el estado del arte debido a las diferencias notorias en la especificación funcional de cada uno de ellos.

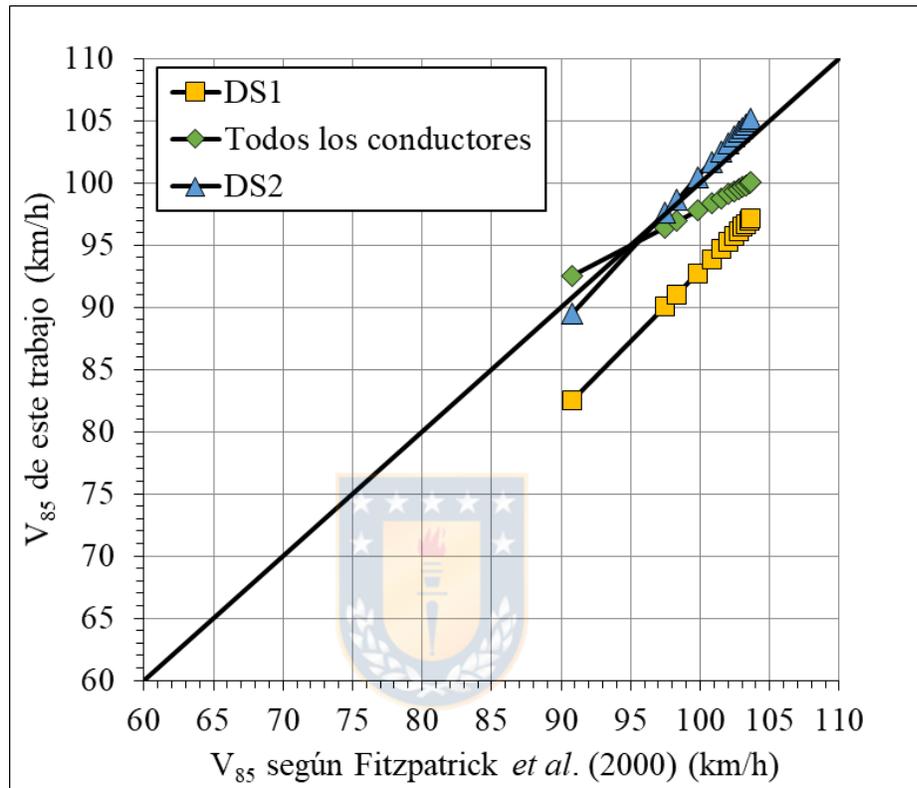


Figura 6.4. Comparación entre los modelos de este estudio y el modelo de Fitzpatrick *et al.* (2000)

A partir de los resultados de la modelación se puede concluir que:

- Existen diferencias estadísticamente significativas en la velocidad de operación en una CVC debido a los diferentes estilos de conducción, alcanzando valores entre 7 y 8 km/h.
- La diferencia de velocidad de operación entre la máxima y mínima curvatura es de 3,5 km/h cuando se agrupan todos los conductores sin considerar sus estilos de conducción. Esto podría llevar a concluir que la velocidad no es sensible a la curvatura de la CVC. Esto evidencia la

relevancia de considerar los estilos de conducción en la modelación de la interacción entre velocidad de operación y geometría.

- Por el contrario, la diferencia velocidad de operación entre la máxima y mínima curvatura obtenida para cada estilo de conducción varía entre 6,9 y 7,4 km/h. Fitzpatrick *et al.* (2000) obtuvieron diferencias similares.
- El modelo calibrado para el grupo de estilos de conducción DS₁ arroja velocidades de operación 6,9 km/h inferiores a las obtenidas por el modelo de Fitzpatrick *et al.* (2000).
- El modelo calibrado para el grupo de estilos de conducción DS₂ resultó similar al modelo de Fitzpatrick *et al.* (2000), alcanzando una diferencia media de 0,9 km/h.

6.5 Conclusiones

Se calibraron y validaron tres modelos de velocidad de operación. Un modelo para toda la muestra de conductores y dos modelos para dos grupos de conductores separados por estilo de conducción. La forma funcional fue una regresión lineal cuya variable independiente fue el inverso de la curvatura vertical. Todos los modelos tienen un coeficiente de correlación superior a 0,6. El error cuadrático medio de los modelos es inferior a 2,8 km/h, lo que muestra una buena capacidad predictiva.

Las predicciones de los tres modelos son estadísticamente diferentes y exhiben diferencias de hasta 8 km/h. De la comparación con los modelos de la literatura, el modelo del grupo DS₂ es estadísticamente similar al desarrollado por Fitzpatrick *et al.* (2000). Que la diferencia de velocidad cuando se agrupan todos los conductores sea de 3,5 km/h lleva a concluir que la velocidad de operación, para ese grupo, no es sensible a la curvatura vertical.

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo por objetivo analizar efecto del estilo de conducción como una aproximación de los factores humanos sobre la velocidad de operación en curvas verticales convexas. Para ello se calibraron modelos de velocidad de operación – curvatura vertical en curvas verticales convexas para dos grupos de conductores clasificados según su estilo de conducción, obtenido con el MDSI. A partir de la clasificación de conductores mediante el MDSI, se identificaron dos grupos de conductores cuya velocidad de operación en las curvas verticales resultó estadísticamente diferente. Un grupo de conductores con estilo de conducción prudente y ansioso (DS_1) y otro grupo con estilo de conducción agresivo, reducción de estrés y riesgo y alta velocidad (DS_2). En todo el rango de curvatura vertical modelado, la velocidad operación asociada al grupo DS_1 resultó sistemáticamente inferior a la modelada por el grupo de conductores DS_2 .

Los modelos de velocidad de operación calibrados para todos los conductores y para los dos grupos de conductores identificados, resultaron estadísticamente significativos, con valores t de las variables elevados, con un coeficiente de correlación ajustado entre 0,55 y 0,97 y un error estándar entre 0,4 y 1,6 km/h.

Se determinó que, al considerar a todos los conductores como un conjunto homogéneo de individuos, la velocidad de operación no varía para diferentes curvaturas verticales y que, por el contrario, al separar por grupos de estilos de conducción la velocidad de operación si resulta sensible a la curvatura vertical. Por lo tanto, no es recomendable asumir como supuesto de modelación la homogeneidad de las características individuales de los conductores.

Por el contrario, al separar los modelos de velocidad de operación por grupo de conductor se obtuvo una variación entre 6,9 y 7,4 km/h respecto de la curvatura vertical, resultado similar al obtenido por Fitzpatrick *et al.* (2000).

Se compararon los modelos desarrollados en esta investigación con los modelos disponibles y comparables del estado del arte. Se concluyó que el modelo que describe a los conductores del grupo DS_2 es comparable con el modelo de Fitzpatrick *et al.* (2000) y que el modelo asociado al

grupo DS₁ predice una velocidad de operación inferior en 7 km/h a la predicha por el modelo de Fitzpatrick *et al.* (2000).

El RMS del modelo para el grupo DS₁ es de 2,6 km/h, para todos los conductores de 2,0 km/h y para el DS₂ de 2,8 km/h. Si se quiere hacer análisis de consistencia, un error del orden de 2,5 km/h en la predicción puede llevar a que el elemento geométrico en análisis pertenezca a un nivel de consistencia que no le corresponde. Para solucionar este problema, se debe mejorar la calidad predictiva de los modelos mediante, por ejemplo, el aumento de la muestra de conductores y el aumento de precisión en la agrupación de los estilos de conducción.

Los modelos desarrollados en esta investigación mostraron que la velocidad de operación no depende solo de la geometría del alineamiento, sino que también del estilo de conducción. Desarrollar modelos diferentes por estilo de conducción permitirá enfocar el diseño de la geometría y de los elementos de seguridad (por ejemplo, barreras de contención) en grupos determinados de conductores. En conclusión, contar con modelos diferentes por estilo de conducción permitirá mejorar la consistencia de los caminos y, por lo tanto, su seguridad.

A partir del presente trabajo se sugiere desarrollar las siguientes líneas de investigación:

- i. Ampliar el análisis del efecto de los estilos de conducción a curvas verticales cóncavas, curvas verticales compuestas, a pendientes uniformes y a trazados horizontales. De este modo, se contará con modelos predictivos para los principales elementos geométricos de las carreteras incluyendo explícitamente factores humanos para explicar de manera más completa la velocidad de operación en caminos bidireccionales pavimentados.
- ii. Relacionar los estilos de conducción con los patrones de aceleración de los conductores en los diferentes elementos geométricos. De este modo, se contará con modelos de aceleraciones que permitan, por ejemplo, determinar umbrales de comodidad y seguridad diferenciados por las características individuales de los conductores.

- iii. Profundizar el análisis de la relación estilo de conducción – velocidad de operación. Para ello se puede: (1) indagar en instrumentos alternativos de identificación del estilo de conducción; (2) separar el análisis en los seis estilos de conducción encontrados en el MDSI validado por González *et al.* (2018) y no en grupos como en este trabajo; y (3) separar por género, rangos de edad y/u otras características individuales de los conductores. Para lograr esto, se debe ampliar a una muestra de conductores que permita tener la variabilidad y cantidad de conductores con cada característica a estudiar. De este modo, se podrá precisar la identificación del estilo de conducción, lo que llevará a disminuir la variabilidad de la velocidad de operación y, finalmente, mejorará la capacidad predictiva de los modelos de velocidad de operación.
- iv. Analizar la incidencia de la geometría estimada en la modelación de la velocidad de operación, mediante la comparación del procedimiento de extracción geométrica utilizado con técnicas de alta precisión como, por ejemplo, el levantamiento topográfico. De este modo, se tendrá una aproximación del error cometido y permitirá mejorar el procedimiento de extracción geométrica y, por lo tanto, de la modelación de velocidad.
- v. Desarrollar modelos de velocidad de operación en caminos de montaña, donde la pendiente longitudinal pueda inducir variaciones en la velocidad de operación. De este modo, se ampliará el espacio de inferencia de las variables independientes y/o se agregarán otras no incluidas en este trabajo.

REFERENCIAS

AASHTO (2018). **A Policy on Geometric Design of Highway and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos.

Abbas, S.K.S., Adnan, M.A. y Endut, I.R. (2012). An investigation of the 85th percentile operating speed models on horizontal and vertical alignments for two-lane rural highways: A case study. **Journal of The Institution of Engineers, Malaysia**, **73(1)**. 31–40.

Cafiso, S. y Cerni, G. (2012). New approach to defining continuous speed profile models for two-lane rural roads. **Transportation Research Record**, **2309**. 157–167.

Cafiso, S., Di Graziano, A. y La Cava, G. (2005). Actual driving data analysis for design consistency evaluation. **Transportation Research Record**, **1912**. 19–30.

Cohen, J. (1988). **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. Segunda edición. Academic Press. Nueva York.



Echaveguren, T., Díaz, Á. y Vargas-Tejeda, S. (2015). Operating speed models for horizontal reverse curves. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport**, **168(6)**. 510–522.

Elander, J., West, R. y French, D. (1993). Behavioral correlates of individual differences in road-traffic crash risk: An examination of methods and findings. **Psychological Bulletin**, **113(2)**. 279–294.

Fambro, D., Fitzpatrick, K. y Russell, C. (2000). Operating speed on crest vertical curves with limited stopping sight distance. **Transportation Research Record**, **1701**. 25–31.

Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B. y Pasetti, K. (2000). **Speed prediction for two-lane rural highways**. FHWA Report FHWA-RD-99-171. Estados Unidos.

García, R., Martínez, D. y García, D. (2012). Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de Villa Clara. **Revista de Ingeniería de Construcción**, **27(2)**. 71–82.

García, Y. (2014). **Aceleraciones y desaceleraciones de vehículos livianos en caminos de montaña**. Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.

González, D., Echaveguren, T., Tudela, A. y Vaccari, P. (2018). Exploración de un instrumento cuantitativo para evaluar estilos de conducción en carreteras en Chile. **VI Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial**. Lima. Peru. Octubre.

Holman, A. y Havârneanu, C. (2015). The Romanian version of the multidimensional driving style inventory: psychometric properties and cultural specificities. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, **35**. 45–59.

Hoof van Huysduynen H., Terken, J., Martens, J-B. y Eggen, B. (2015). Measuring driving styles: a validation of the multidimensional driving style inventory. **Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications**. Nottingham. Reino Unido. Septiembre.

Jessen, D., Schurr, K., McCoy, P., Pesti, G. y Huff, R. (2001). Operating speed prediction on crest vertical curves of rural two-lane highways in Nebraska. **Transportation Research Record**, **1751**. 67–75.

Karjanto, J., Md. Yusof, N., Terken, J., Hassan, M.Z., Delbressine, F., Hooft van Huysduynen, H. y Rauterberg, M. (2017). The identification of Malaysian driving styles using the multidimensional driving style inventory. **Proceedings in MATEC Web of Conferences**, **90**. 1–14. DOI: 10.1051/mateconf/20179001004.

Lajunen, T. y H. Summala (1995) Driving experience, personality, and skill and safety motive dimensions in drivers' self assessments. **Personality and Individual Differences**, **19(3)**. 307-

318.

Poó F., Taubman-Ben-Ari, O., Ledesma, R. y Díaz-Lázaro, C. (2013). Reliability and validity of a Spanish-language version of the multidimensional driving style inventory. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, **17**. 75–87.

Racelogic (2008). **VBOX Mini User Guide**. Reino Unido.

Sagberg, F., Selpi, Bianchi Piccinini, G.F. y Engström, J. (2015). A review of research on driving styles and road safety. **Human Factors**, **57(7)**. 1248–1275.

Taubman - Ben-Ari, O., Mikulincer, M. y Gillath, O. (2004). The multidimensional driving style inventory-scale construct and validation. **Accident Analysis and Prevention**, **36(3)**. 323–33.

