

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Dr. Sergio Vargas Tejada

**IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTO PARA  
LA EVALUACIÓN DE PISTAS LENTAS EN  
CARRETERAS DE DOS PISTAS**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para optar al título de Ingeniero Civil.

**JAVIERA FERNANDA VALENZUELA CAMPOS**

**CONCEPCIÓN, MAYO DEL 2013**

*Dedicado a mi abuela, a quién perdí hace poco pero  
que desde el cielo, hoy cuida cada paso que doy.*

## *AGRADECIMIENTOS:*

*Preparar el proyecto de título, y en general, recorrer todo el camino universitario, no hubiese sido posible sin el apoyo incondicional de mi familia.*

*Doy gracias a ellos por su apoyo anímico y monetario, por el esfuerzo que hacían todos los días para cumplir la meta de mis estudios, y por la forma en que transmitieron el orgullo que sentían por mí. Eso fue la energía que tenía día a día para cerrar este capítulo tan importante.*

*Doy gracias a la familia Valenzuela Gálvez, mi segunda familia, especialmente a Camila. Gracias simplemente por estar en todos los momentos importantes, incluyendo el cierre de esta etapa.*

*Doy gracias por haber conocido tanta gente hermosa a medida que pasaron estos años, en especial a mi grupo de amigos y compañeros, que no sólo me apoyaron personalmente, sino que también lo hicieron abriéndome las puertas de sus casas para hacerme parte de sus familias. Debo agradecer particularmente a la familia Saavedra Cifuentes quienes fueron los que me guiaron y aconsejaron en los primeros años en Concepción. Doy gracias especialmente a mi amiga Karim, quien fue un apoyo fundamental estos años, entregándome los consejos precisos y necesarios cuando el ánimo decaía, permitiéndome además ser un integrante más de su familia.*

*Doy gracias a Dios, por haberme protegido e iluminado en cada paso que di.*

*Doy gracias a mi profesor guía, Sr. Sergio Vargas Tejada, quien formó este trabajo y a quien admiro por sus conocimientos y por la gentileza de transmitirlos a sus alumnos.*

*Finalmente, doy gracias al Departamento, incluyendo a sus profesores, secretarías (especialmente a Jéssica), auxiliares y alumnos por hacer de esta experiencia, la más grata, familiar y especial de todas.*

## **NOMENCLATURA**

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
HCM	: Highway Capacity Manual
IC	: Instrucciones de Carreteras
MDGC	: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras
MOP	: Ministerio de Obras Públicas
PDT	: Porcentaje de Demora en Tiempo
PVFL	: Porcentaje de Velocidad de Flujo Libre
SHGDM	: State Highway Geometric Design Manual
V <sub>mv</sub>	: Velocidad Media de Viaje

## INDICE

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Contexto.....	3
1.2 Identificación y justificación del problema .....	3
1.3 Alcances de la investigación.....	4
1.4 Objetivos de la investigación.....	5
2 METODOLOGÍA .....	6
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	7
3.1 Conceptos de Capacidad y Niveles de Servicio en vías Bidireccionales .....	7
3.2 Variables Influyentes en Pendiente Ascendente de Carretera de Dos Pistas.....	7
3.3 Criterios Normativos.....	9
3.4 Análisis de Criterios de Justificación de Pistas Lentas.....	9
4 PROCEDIMIENTO PARA LA JUSTIFICACIÓN DE PISTAS LENTAS.....	12
4.1 Análisis de criterios de justificación.....	12
4.2 Análisis de escenarios .....	13
4.3 Desarrollo procedimiento para justificación de pista lenta.....	18
4.4 Limitaciones de procedimiento para justificación de pista lenta.....	21
4.5 Automatización de procedimiento para justificación de pista lenta .....	22
5 APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTO AUTOMATIZADO A CASOS REALES .....	24
5.1 Identificación y Descripción de Tramos a Analizar .....	24
5.2 Aplicación de Procedimiento Automatizado .....	25
5.3 Verificación con metodología directa de HCM 2010.....	27
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
6.1 Conclusiones.....	30

6.2	Recomendaciones .....	32
7	REFERENCIAS .....	33
8	ANEXOS.....	34

**INDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Rango de Variables para Matriz de Combinaciones ..... 13

Tabla 2. Matriz de Combinación de Variables ..... 14

Tabla 3. Resultado de procedimiento automatizado para Tramo 1 ..... 26

Tabla 4. Resultado de procedimiento automatizado para Tramo 2 ..... 26

Tabla 5. Resultado de procedimiento automatizado para Tramo 3 ..... 27

Tabla 6. Resultado de cálculos directos para Tramo 1, 2 y 3 ..... 28

Tabla 7. Comparación resultados de Tramo 1 ..... 29

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Estructura metodológica..... 6

Figura 2. Procedimiento para justificación de pistas lentas..... 12

Figura 3. Modelo geométrico asumido en el procedimiento ..... 15

Figura 4. Ejemplo de análisis de matrices ..... 16

Figura 5. Metodología para el Desarrollo del Procedimiento de Justificación de Pista Lenta..... 18

Figura 6. Programa en Excel para evaluación de pista adicional ..... 22

Figura 7. Ubicación de tramos en estudio ..... 24

## IMPLEMENTACIÓN DE PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE PISTAS LENTAS EN CARRETERAS DE DOS PISTAS

Javiera Fernanda Valenzuela Campos

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

[javvalen@alumnos.ubiobio.cl](mailto:javvalen@alumnos.ubiobio.cl)

Profesor Patrocinante: Sergio Vargas Tejeda

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

[svargas@ubiobio.cl](mailto:svargas@ubiobio.cl)

### RESUMEN

Una pista lenta es una pista adicional que permite el tránsito de los vehículos lentos en pendiente ascendente, en tramos donde la reducción de velocidad de los vehículos pesados es considerable.

Si bien, una pista lenta genera una mejora en la operación en carreteras de dos pistas, no necesariamente siempre se justifica económicamente. Es por ello, que en distintos países existen criterios que deben ser satisfechos para su justificación. No obstante en Chile, se entregan algunas recomendaciones en cuanto a reducciones de velocidad de vehículos pesados, sin profundizar en el análisis de variables que involucran la justificación de una pista adicional.

Debido a la falta de herramientas que permitan verificar los criterios, nace la idea de implementar un procedimiento que evalúe la necesidad de una pista adicional en carreteras de dos pistas, en base a la experiencia internacional. Para ello, se identificaron las principales variables en la justificación de pistas lentas: magnitud y longitud de la pendiente, volumen del flujo vehicular, porcentaje de vehículos pesados y velocidad de flujo libre. Posteriormente las variables involucradas fueron combinadas a través de una matriz de diseño, que permitió analizar distintos escenarios y evaluar para cada caso los criterios de justificación de pista lenta de modo de generar una regla de decisión para un escenario cualquiera. Para facilitar el procedimiento se desarrolló una macro Excel que automatiza el proceso. El procedimiento fue aplicado a 3 casos reales, obteniendo resultados muy similares a los obtenidos manualmente que avalan la utilidad de la aplicación creada.

**Palabras claves:** Pista Lenta, Vehículos Pesados, Magnitud y Longitud de Pendiente.

**Número de Palabras:** 6.500 Palabras Texto + 14 Figuras/Tablas\*250 = 10.000

**ABSTRACT**

Climbing lanes are additional lanes for heavy vehicles on an ascending slope, in sections where the reduction of heavy vehicle speeds are considerable.

While climbing lanes generate improvement in the operation of two lane roads, many times are not necessarily justified economically. It is for this reason that in different countries there are criteria that must be satisfied for their implementation. In Chile, some recommendations for reductions in heavy vehicle speeds are given in the design standards, without further analysis of variables involving the justification of an additional lane.

In this work, a procedure to evaluate the need for an additional lane in two lane roads, based on international experiences, is proposed. For this, main variables for the justification of climbing were identified, these are: magnitude and slope length, traffic flow volume, percentage of heavy vehicles and free flow speed. Variables involved were subsequently combined through a design matrix, which allowed the analysis and evaluation of different scenarios that justified climbing lanes, generating a decision rule for any scenario. To automate the process an Excel macro was developed. The procedure was applied to three case studies; supporting the usefulness of the created application and obtaining similar results to those obtained manually with HCM procedure.

**Keywords: Climbing lane, heavy trucks, magnitude and slope length.**

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Contexto**

La mayoría de las carreteras en Chile corresponden a carreteras bidireccionales de dos pistas. El nivel de servicio de este tipo de carreteras queda condicionado fuertemente con la posibilidad de adelantamiento. Cuando la visibilidad es insuficiente, éste tipo de maniobras deben ser prohibidas para así evitar accidentes (MDGC, 2001). Algunos factores que influyen en la posibilidad de adelantamiento son las altas pendientes y/o pendientes en tramos largos, produciendo reducciones del nivel de servicio en una carretera. Éstas reducciones son influenciadas principalmente por el porcentaje de camiones que circulan por la pista, la distancia a lo largo de la cual se mantiene la situación (no adelantar) y el valor de la pendiente. Ésta última, efectivamente porque una pendiente elevada y prolongada, produce un descenso de velocidad importante en los vehículos pesados (MOP, 2012).

Apenas la inclinación de la pendiente supera un 3% y la rampa es larga, los vehículos pesados se ven afectados en sus velocidades de operación. Como además coincide con la restricción de visibilidad, es difícil efectuar adelantamiento a este tipo de vehículos. Una alternativa para solucionar el efecto provocado por vehículos pesados es modificar la inclinación de la rasante, para así disminuir el valor de la pendiente. Sin embargo, una medida de este tipo resulta difícil en términos técnicos y económicos, por lo que una solución factible es disponer de una pista adicional para la circulación lenta (MDGC, 2001).

Si bien hace algún tiempo el uso de pistas adicionales en subida fue bastante limitado, debido a los costos asociados a su construcción, actualmente éstas están siendo incluidas en los planes de diseño, debido a que solucionan problemas de nivel de servicio y capacidad en las vías, además de disminuir la cantidad de accidentes, siendo consideradas como mejoras en la seguridad vial (AASHTO, 2001).

### **1.2 Identificación y justificación del problema**

Una pista lenta es una pista adicional ubicada en carreteras de dos pistas bidireccional, en pendiente ascendente, que ofrece una alternativa relativamente económica para superar la reducción del nivel de servicio causada por los vehículos pesados (AASHTO, 2001).

Los vehículos pesados, reducen significativamente su velocidad al enfrentarse a pendientes sobre un 3%, más aún cuando la longitud de ésta es alta (MOP, 2012). El State Highway Geometric Design Manual (SHGDM, 2002) señala que la reducción de velocidad depende de la relación

peso/potencia del vehículo, de la magnitud y longitud del tramo en pendiente, además de la incapacidad de los conductores de los vehículos para realizar maniobras de adelantamiento en forma segura. Todo esto genera la necesidad de considerar diseños que permitan mejorar el nivel de servicio de los flujos de tránsito.

Normativas como la AASHTO de Estados Unidos, la SHGDM de Nueva Zelanda, y la 3.1-IC de España, establecen criterios para la proyección de pistas lentas, haciendo referencia a la magnitud de la reducción de velocidad, variación en el nivel de servicio, relación peso/potencia de los vehículos pesados, etc. Sin embargo, no hay una metodología clara que involucre el análisis de todos éstos criterios para reconocer si la instalación de una pista adicional se justifica o no.

Un ejemplo es que, en carreteras con un bajo volumen, en ocasiones solo un automóvil de vez en cuando retrasa la circulación vehicular, siendo deseable una pista adicional. Sin embargo económicamente no estaría justificado, incluso cuando se ve superada la longitud crítica de la pendiente. En ocasiones, también consideraciones de seguridad pueden justificar una pista adicional de ascenso, sin considerar factores como el volumen del tráfico en pendiente (AASHTO, 2001). Por otro lado el MDGC de Perú, también hace referencia a lo anterior, especificando que si las condiciones de operaciones no se ven perjudicadas, o los volúmenes de tránsito son muy bajos, la pista adicional no se justificaría económicamente.

Es por ello, que surge la idea de crear un procedimiento que involucre el análisis de los criterios relacionados con la operación de los vehículos en subida, para poder justificar la implementación de una pista adicional en pendiente ascendente. Para lograr esto, el estudio se basó en la normativa nacional y extranjera, con el fin de identificar y proponer los criterios de justificación, y automatizar los criterios de decisión.

### **1.3 Alcances de la investigación**

El procedimiento propuesto considera sólo criterios de justificación, no así de diseño. Además no considera la influencia de los costos al momento de analizar los criterios de decisión.

Se contempla además el beneficio, en cuanto a nivel de servicio, que provoca la instalación hipotética de una pista adicional.

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### *1.4.1 Objetivo General*

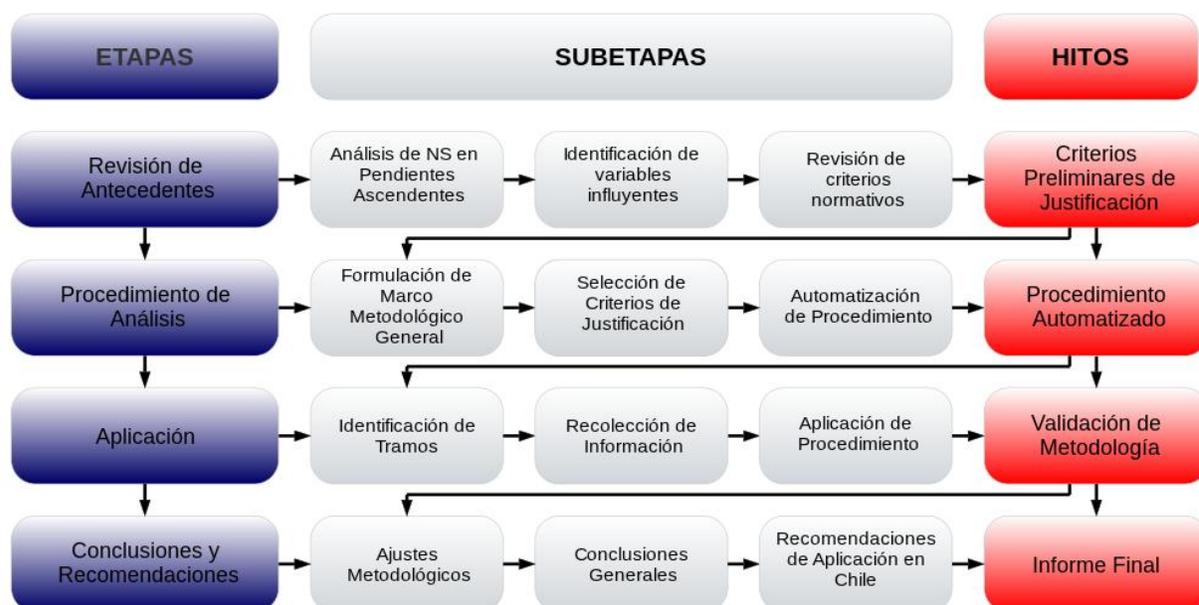
Implementar un procedimiento automatizado para evaluar la necesidad de pistas lentas en carreteras de dos pistas, en base a la experiencia internacional.

### *1.4.2 Objetivos Específicos*

- a) Sintetizar y comparar los criterios de justificación de pistas lentas establecidos tanto en Chile como en el extranjero.
- b) Proponer un procedimiento para evaluar la necesidad de pistas lentas en distintos escenarios, según criterios establecidos en la literatura.
- c) Automatizar el procedimiento propuesto, para la justificación y evaluación de pistas lentas.
- d) Aplicar el procedimiento a casos reales de la región del Bio Bio.
- e) Establecer recomendaciones para su utilización en Chile.

## 2 METODOLOGÍA

La Figura 1 muestra el esquema metodológico utilizado en esta investigación para dar cumplimiento a los objetivos planteados.



**Figura 1. Estructura metodológica**

**Etapa 1-** Revisión de Antecedentes: Se realizó una revisión de las principales normativas nacionales e internacionales, identificando las variables y los criterios de justificación de una pista lenta en carreteras de dos pistas.

**Etapa 2-** Procedimiento de Análisis: Se formuló un procedimiento, basado en los criterios expuestos en las normativas, para la evaluación de criterios de justificación de una pista lenta. Posteriormente éste se automatizó para facilitar la entrega de información.

**Etapa 3-** Aplicación: Se aplicó el procedimiento a 3 casos, dos de ellos con la existencia de una pista para vehículos lentos. En cada uno se identificaron las variables necesarias para la evaluación de criterios, para posteriormente aplicar el procedimiento de justificación de pista lenta.

**Etapa 5-** Conclusiones y Recomendaciones: Luego de realizada la aplicación se realizaron conclusiones y recomendaciones para la aplicación del procedimiento.

### **3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En este capítulo se entregan los conceptos básicos del tema en estudio. Para ello, se identifican las principales variables que afectan el normal funcionamiento de un vehículo al transitar en una carretera de dos pistas con pendiente ascendente. Posteriormente se realiza una breve descripción de los criterios especificados en la normativa nacional e internacional, respecto a la justificación de pista lenta. Así también se entregan los criterios de justificación de pista lenta que serán utilizados en el desarrollo de esta investigación.

#### **3.1 Conceptos de Capacidad y Niveles de Servicio en vías Bidireccionales**

Se conoce como capacidad de una carretera el máximo volumen horario equivalente que ésta pueda tener en un determinado intervalo de tiempo, mientras que el nivel de servicio es conocido como un valor cualitativo basado en la percepción del conductor en cuanto a la facilidad operacional que se le este entregando.

Las carreteras de dos pistas poseen una gama de funciones, desde permitir enlazar redes nacionales hasta servir como vías recreacionales. Este tipo de vías se caracterizan por disminuir su calidad de operación precipitadamente a medida que aumenta la demanda de flujo, pudiendo llegar a tener operaciones inaceptables. Debido a las amplias funciones que pueden tener estas carreteras, el HCM (2010) establece una metodología de análisis operacional para carreteras de dos pistas, que permite determinar el nivel de servicio en ambas direcciones, además de poder analizar también un segmento de carretera con la presencia de una pista lenta.

Para la determinación de nivel de servicio, el HCM (2010) diferencia la metodología para tres distintas clases de carreteras. Las dos primeras abordan zonas rurales de carreteras de dos pistas, mientras que la tercera representa a carreteras en zonas desarrolladas. Las clases mencionadas, así como la metodología para la determinación del Nivel de Servicio, se definen en el Anexo B.

#### **3.2 Variables Influyentes en Pendiente Ascendente de Carretera de Dos Pistas**

En general, las carreteras de dos pistas se encuentran limitadas para maniobras de adelantamiento puesto que se encuentran condicionadas por la disponibilidad de espacios y la visibilidad en la pista contraria (HCM, 2000). La maniobra de adelantamiento se ve afectada por variables como la demanda de flujo opuesto y la distancia de visibilidad que posea el conductor al momento de decidir realizar la maniobra. Si a lo anterior se agregan condiciones físicas de una carretera de dos pistas bidireccional y presencia de vehículos pesados las condiciones de adelantamiento son

aún más desfavorables, condicionando la velocidad de operación y provocando una reducción del nivel de servicio de la vía (MOP, 2012).

El nivel de servicio de la carretera, depende de variables como la magnitud y longitud de la pendiente, del porcentaje de vehículos pesados y la demanda de flujo que existe en el tramo de estudio. El MOP (2012) señala que las variables dependen una de la otra, puesto que cada una por sí sola no necesariamente afectaría totalmente en el adecuado funcionamiento en la vía.

A continuación se presenta una breve descripción de las variables que influyen en la operación de los vehículos en pendiente ascendente.

### *3.2.1 Magnitud de Pendiente*

La pendiente es la inclinación de la rasante, respecto a la horizontal. Comúnmente se expresa como porcentaje, siendo positivas las ascendentes y negativas las descendentes. Las pendientes ascendentes tienen un efecto negativo sobre la velocidad de los vehículos pesados, puesto que a medida que aumenta la magnitud de éstas, aumenta la resistencia gravitacional y las reducciones de velocidad son cada vez más considerables.

### *3.2.2 Longitud de Pendiente*

La longitud de la pendiente, es la distancia que existe desde el inicio de la pendiente hasta el inicio de la próxima sección de la vía, pudiendo ser una recta u otra pendiente. Ésta variable, al igual que la anterior influye directamente en la reducción de la velocidad de los vehículos, variando según la relación peso potencia que éstos tengan. El concepto de longitud crítica se refiere a la longitud máxima que puede tener la pendiente para evitar cierta reducción de velocidad de los camiones.

### *3.2.3 Vehículos pesados*

El flujo vehicular de una vía está compuesto por diversos tipos de vehículos, entre ellos los vehículos pesados, cuyas dimensiones y características físicas influyen en gran medida el diseño geométrico de una carretera.

En tramos de pendientes ascendentes, se ve reducida su velocidad, dependiendo de la razón peso/potencia que posea y de la velocidad de ingreso que tenga a la pendiente (Arellano, 2011).

### *3.2.4 Demanda de flujo*

La demanda de flujo, es generalmente expresada en vehículos por hora bajo las condiciones prevalecientes en la vía. Sin embargo, el indicador de tránsito más frecuente que se utiliza mundialmente en estudios de carreteras es el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA), el cual representa, para un sector de la vía, el promedio aritmético de volúmenes diarios para todos los días del año. En relación a lo anterior, se requiere que el volumen de la demanda sea menor a la capacidad para mantener un nivel de servicio aceptable.

### *3.2.5 Velocidad de proyecto*

Esta velocidad, permite definir las características geométricas mínimas en el trazado contemplando condiciones de seguridad y comodidad. Por ende, se puede decir que transitar por la vía a esta velocidad, entregará seguridad y comodidad al conductor. Dependiendo de las condicionantes presentes en la carretera, la velocidad de los vehículos puede disminuir lo que provocaría una reducción en el nivel de servicio.

## **3.3 Criterios Normativos**

Luego de identificadas las variables, se revisó el material expuesto en las normativas nacionales e internacionales, para conocer y entender la utilización de éstas respecto a la justificación de una pista adicional en subida, exponiendo los criterios de justificación que utiliza cada una de ellas. Un detalle de las normativas revisadas se pueden ver en Anexo A.

## **3.4 Análisis de Criterios de Justificación de Pistas Lentas**

De la revisión bibliográfica, se analizaron todos los criterios y variables presentadas en las normativas estudiadas. Si bien, algunas de ellas eran coincidentes al momento de entregar los criterios de justificación, la normativa que involucra más variables y profundiza en mayor grado el tema es AASHTO, considerando flujos vehiculares, nivel de servicio, presencia de vehículos pesados, etc. Es por ello, que en conformidad con lo requerido para esta investigación y coincidiendo con el HCM 2010 que también hace referencia a los criterios entregados por AASHTO, se trabajó con dicha normativa para formular un procedimiento para la justificación de pistas lentas en subida.

Para efectos del procedimiento que se presenta más adelante, una pista adicional en subida se justifica considerando las siguientes situaciones:

### *3.4.1 Flujo vehicular superior a 200 veh/h*

Si bien, AASHTO no especifica razones por las cuales se usa este valor como límite, Monsalvez (2004) modeló con un flujo vehicular de 200 veh/h distintas condiciones de porcentaje de camiones, inclinación y largo de pendiente, dando como resultado condiciones severas que pudiesen superar la capacidad de la vía. Esta variable es de tipo operacional, que combinado con factores como inclinación y longitud de pendiente pudiese afectar en gran medida el comportamiento vehicular. Es por ello, que se considera como uno de los criterios que debe estar presente al momento de justificar la incorporación de una pista lenta.

### *3.4.2 Flujo de vehículos pesados en subida superior a 20 veh/h*

Este criterio, es una restricción directa al principal factor que influye en la reducción de velocidad y por ende al nivel de servicio en un segmento de carretera con pendiente ascendente. Si bien, AASHTO no especifica los motivos del por qué se usa este valor como límite, bajo condiciones normales (Flujo=200 veh/h y Pvp=10%) éste volumen de vehículos pesados ya presenta niveles de servicios por debajo de los óptimo requeridos en una carretera, como se aprecia en la Tabla A4 del Anexo A.

### *3.4.3 Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h*

AASHTO recomienda una disminución de velocidad aceptable para vehículos pesados de hasta 15 km/h. Esto es determinado mediante las curvas de reducción de velocidad para un camión tipo presentadas a través de la Figura A3 de Anexo A. Esta normativa asume una velocidad de entrada a la pendiente de 110 km/h, por lo que solo se aceptaría que el vehículo disminuya su velocidad a 95 km/h. A pesar de lo anterior, en Chile el MCV3 fundamenta que para las condiciones imperantes en el país, se aceptan reducciones de velocidad de hasta 40 km/h en campo abierto. Al igual que AASHTO esto se determina a través de curvas de reducción de velocidad presentadas en Figura A2 de Anexo A, con la diferencia de que se asume una velocidad de entrada de 88 km/h, más aceptable a las condiciones operantes en las carreteras bidireccionales de Chile. Según estudio de velocidades en algunas carreteras de la región del Bío Bío. realizado por Mejias (2012), la velocidad media de los vehículos pesados, en un ancho de pista superior a 3.3 metros es de 82 km/h, lo que avala el uso de las curvas presentadas en el Manual de Carreteras debido a que son más representativas respecto al comportamiento de los vehículos pesados en la Región.

#### *3.4.4 Nivel de Servicio en pendiente E o F*

Al evaluar el NS, se considera el efecto provocado por la mayoría de los factores que afectan el normal funcionamiento de una carretera en pendiente, convirtiendo a este criterio en uno de los más completos. Según MCV3, cuando la carretera opera al total de su capacidad se habla de NS E, mientras que cuando opera a flujo forzado se habla de NS F. Por lo que este criterio en compañía del cumplimiento de los anteriores, justifica una pista adicional cuando la carretera en pendiente está funcionando en condiciones de capacidad o peores.

#### *3.4.5 Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente*

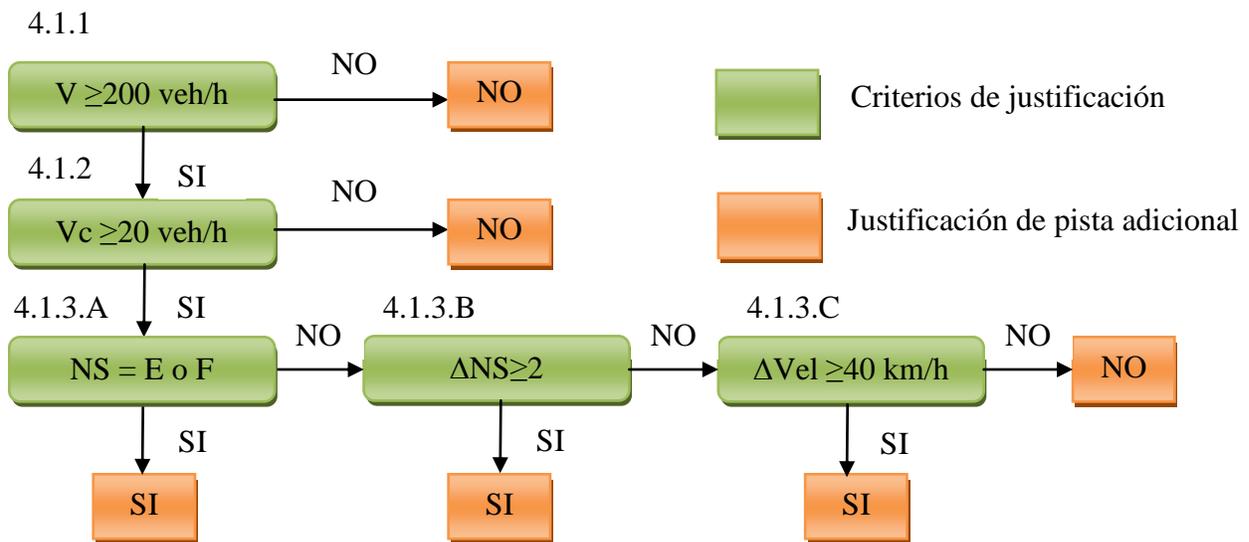
Como último criterio, se analiza el paso del vehículo desde un tramo plano a uno con pendiente. En condiciones óptimas, se debiese entregar un nivel de servicio al conductor igual para todo el tramo de carretera, sin embargo en la práctica esto no es posible debido a condiciones como las analizadas en esta investigación, en las que producto de una inclinación y presencia de vehículos pesados el nivel de servicio pudiese caer significativamente con respecto al tramo anterior. Además considerando variables económicas, en muchas ocasiones no es posible mantener sin reducciones de nivel de servicio el tramo completo de carretera. Es por ello, que AASHTO limita esa reducción a dos niveles de servicio. Un valor superior a esto, y en compañía del cumplimiento de alguno de los anteriores, justificaría una pista adicional.

## 4 PROCEDIMIENTO PARA LA JUSTIFICACIÓN DE PISTAS LENTAS

En este capítulo se propone un procedimiento para la evaluación de pistas lentas en carreteras de dos pistas.

### 4.1 Análisis de criterios de justificación

Si bien, todos los criterios presentados en el punto anterior son importantes para justificar una pista lenta, de acuerdo a AASHTO no necesariamente se deben cumplir todos para que ésta sea justificada. En la Figura 2 se propone un marco metodológico para verificar la justificación de una pista adicional en subida, basado en los criterios seleccionados en este trabajo.



**Figura 2. Procedimiento para justificación de pistas lentas**

De la Figura 2 se aprecia que, para que se justifique una pista adicional se deben cumplir 3 puntos:

- 4.1.1 Flujo vehicular (V) sea superior a 200 veh/h
- 4.1.2 Flujo de vehículos pesados (Vc) superior a 20 veh/h
- 4.1.3 Cualquiera de las siguientes condiciones:
  - 4.1.3.A Nivel de Servicio E o F en pendiente
  - 4.1.3.B Reducción de 2 niveles de servicio en tramos adyacentes (antes de pendiente y en pendiente).
  - 4.1.3.C Reducción de velocidad de vehículos pesados superior a 40 km/h

## 4.2 Análisis de escenarios

Para conocer bajo qué condiciones se justifica una pista adicional en subida, se realizó un análisis de distintos escenarios que contemplan la combinación de todas las variables identificadas en la revisión bibliográfica e involucradas en los criterios antes mencionados. Éstas fueron subdivididas en intervalos (Alto, Medio, Bajo), para posteriormente ser analizadas en una matriz de combinación.

Las variables consideradas para establecer los escenarios y sus respectivos niveles fueron:

- Velocidad de operación: Bajo, Medio, Alto.
- Volumen vehicular: Bajo, Medio, Alto.
- Porcentaje de vehículos pesados: Bajo, Medio, Alto.
- Longitud de pendiente: Bajo, Medio, Alto.
- Magnitud de pendiente: Bajo, Medio, Alto.

Los niveles establecidos para cada rango, fueron determinados luego de la revisión bibliográfica.

Los valores establecidos considerados para cada uno de los niveles se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Rango de Variables para Matriz de Combinaciones**

Variable	Bajo	Medio	Alto	Fuente
Veh. Pesados (%)	18 – 28	28 – 36	36 – 60	Valdebenito (2011)
TMDA (veh/día)	200 – 1400	1400 – 2600	2600 – 9200	Valdebenito (2011)
Pendiente (%)	1 – 4	4 – 8	8 – 12	Arellano (2011)
Longitud (Km)	0 – 1	1 – 2	2 – 4	Arellano (2011)
Velocidad operación (Km/h)	60	80	100	MOP (2012)

Luego de establecidos los intervalos, se creó una matriz de combinación de variables que definió distintos escenarios de análisis, tal como se visualiza en la Tabla 2. El principal objetivo de esta matriz fue ordenar las variables explicativas y analizar el comportamiento de la variable respuesta

para las distintas combinaciones. En este caso las variables respuesta serían volumen de vehículos (V), volumen de vehículos pesados (Vc), nivel de servicio (NS) y reducción de velocidad ( $\Delta$ Vel), los cuales permiten verificar los criterios de justificación definidos anteriormente.

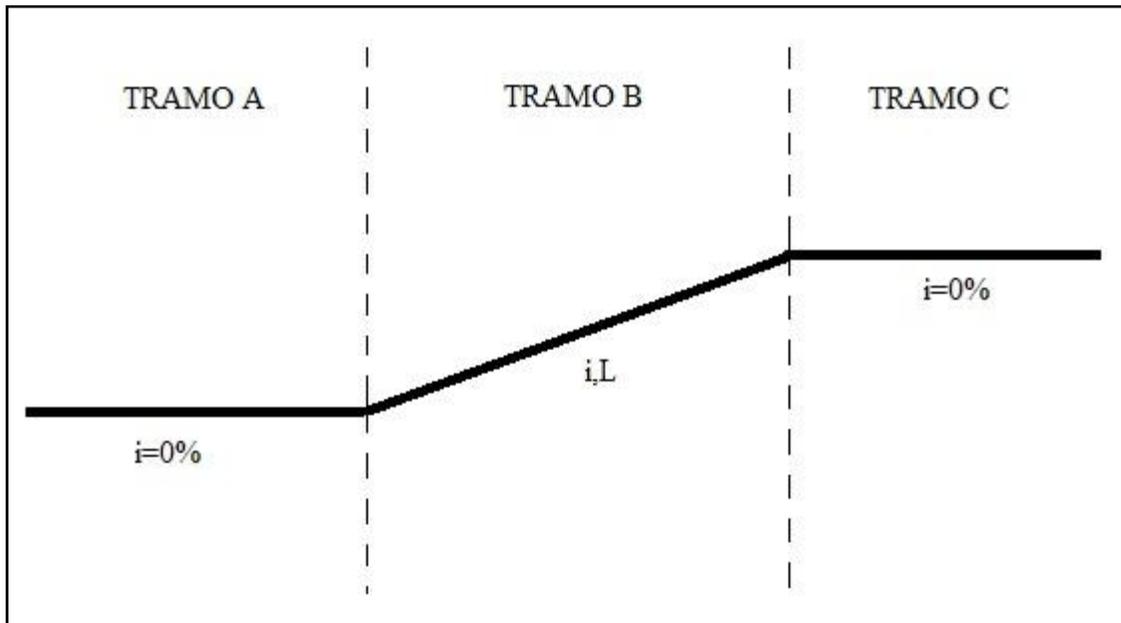
**Tabla 2. Matriz de Combinación de Variables**

Velocidad de operación (km/h)	Volumen vehicular (veh/h)	Porcentaje de Veh. Pesados (%)	Longitud de Pendiente									
			B			M			A			
			Magnitud de Pendiente									
			B	M	A	B	M	A	B	M	A	
B	B	B										
		M										
		A										
	M	B										
		M										
		A										
	A	B										
		M										
		A										
M	B	B										
		M										
		A										
	M	B										
		M										
		A										
	A	B										
		M										
		A										
A	B	B										
		M										
		A										
	M	B										
		M										
		A										
	A	B										
		M										
		A										

Nota: B= Bajo; M= Medio; A=Alto

En cada uno de los intervalos (Bajo, Medio, Alto), se trabajaron 2 valores representativos, los que fueron asumidos en los tercios menores y mayores de cada rango establecido, obteniendo como resultado una matriz de 3.888 combinaciones para cada cálculo dentro del análisis.

Para la aplicación del procedimiento, en cada una de sus estimaciones, se asume el modelo geométrico de la Figura 3.



**Figura 3. Modelo geométrico asumido en el procedimiento**

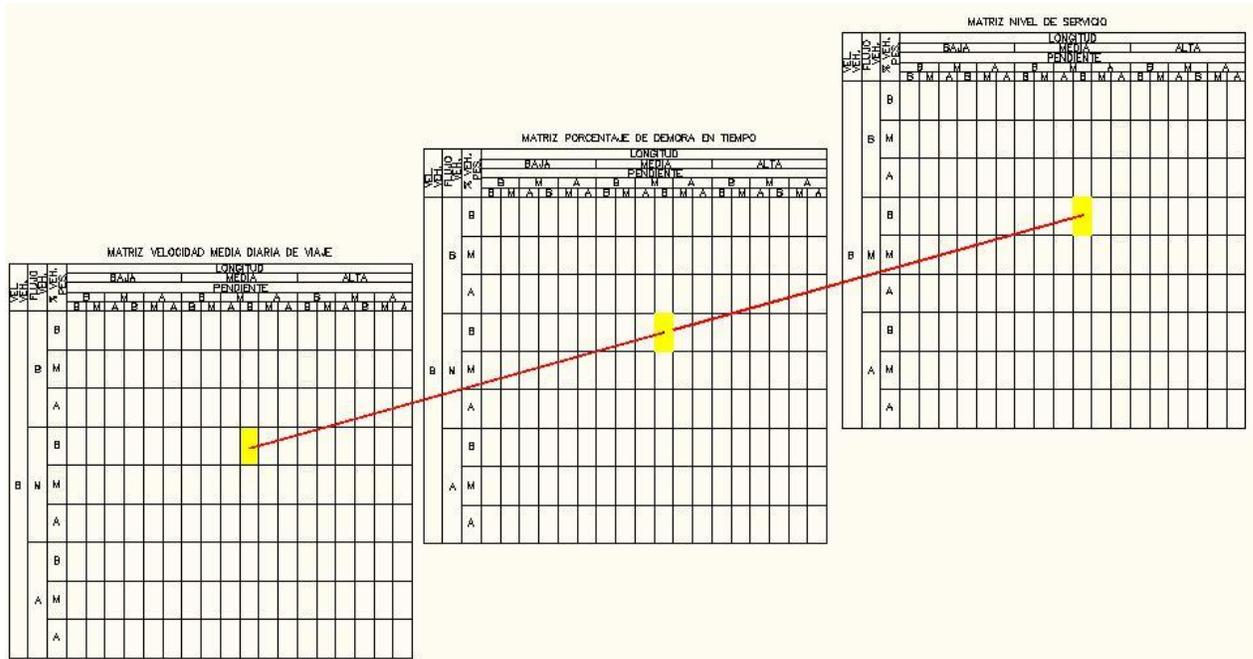
El modelo geométrico utilizado para verificar los criterios de justificación considera tres tramos:

TRAMO A: Segmento anterior a pendiente, considerado como terreno a nivel, con pendiente igual a 0.

TRAMO B: Segmento de análisis de pista lenta. Presenta pendiente ascendente, variando su magnitud y longitud para los distintos análisis. Se asume como velocidad de entrada de los vehículos pesados la que éstos llevan al iniciar este tramo.

TRAMO C: Segmento posterior a pendiente, considerado como terreno a nivel, con pendiente igual a 0.

Como se mencionó anteriormente, se obtuvieron matrices respuesta según la necesidad del criterio a analizar. A modo de ejemplo, se observa en la Figura 4, que para la determinación del Nivel de Servicio es necesario analizar la Velocidad Media de Viaje (Vmv) y el Porcentaje de Demora en Tiempo (PDT). Lo anterior, para cada una de las combinaciones. Esto se repite para todas las matrices respuesta involucradas en la justificación de pistas lentas.



**Figura 4. Ejemplo de análisis de matrices**

Finalmente, se obtuvieron 5 matrices, referidas a los criterios 4.1.3.A, B y C respectivamente. Cada matriz contiene en sus celdas el nivel de servicio en la pendiente, el nivel de servicio en terreno a nivel, la reducción del nivel de servicio entre ambos tramos, la reducción de velocidad de los camiones y el nivel de servicio al incorporar una pista lenta, para cada escenario considerado.

a) Matriz de Nivel de Servicio en Pendiente

Con la finalidad de evaluar el criterio 4.1.3.A, se determinó el Nivel de Servicio según HCM 2010, descrito en punto B1.1, de Anexo B, para cada uno de los escenarios. Los resultados para cada escenario de la matriz de combinaciones se presentan en la Tabla D6 del Anexo D, mientras que las variables, Vmv y PTD, necesarias para determinar dicho nivel de servicio se presentan en las Tablas D4 y D5 respectivamente, en el mismo anexo.

b) Matriz de Nivel de Servicio en terreno a nivel

Para evaluar el criterio 4.1.3.B, es necesario conocer el Nivel de Servicio anterior al tramo con pendiente. Para ello, se determinó el Nivel de Servicio según HCM 2010, descrito en punto B1.1, de Anexo B bajo condiciones de terreno a nivel. Los resultados para cada escenario de la matriz de combinaciones se presentan en la Tabla D3 del Anexo D, mientras que las variables,  $V_{mv}$  y PTD, que permiten determinar dicho nivel de servicio se presentan en las Tablas D1 y D2 respectivamente, del mismo anexo.

c) Reducción de Nivel de Servicio al ingresar a pendiente

Luego de obtenida la matriz de Nivel de Servicio en Pendiente y la matriz de Nivel de Servicio en el tramo anterior a la pendiente, se compara ambas matrices para determinar la reducción del nivel de servicio en cada escenario. Los resultados para cada escenario de la matriz de combinaciones se presentan en la Tabla D10 del Anexo D.

d) Reducción de Velocidad de vehículos pesados al ingresar a pendiente

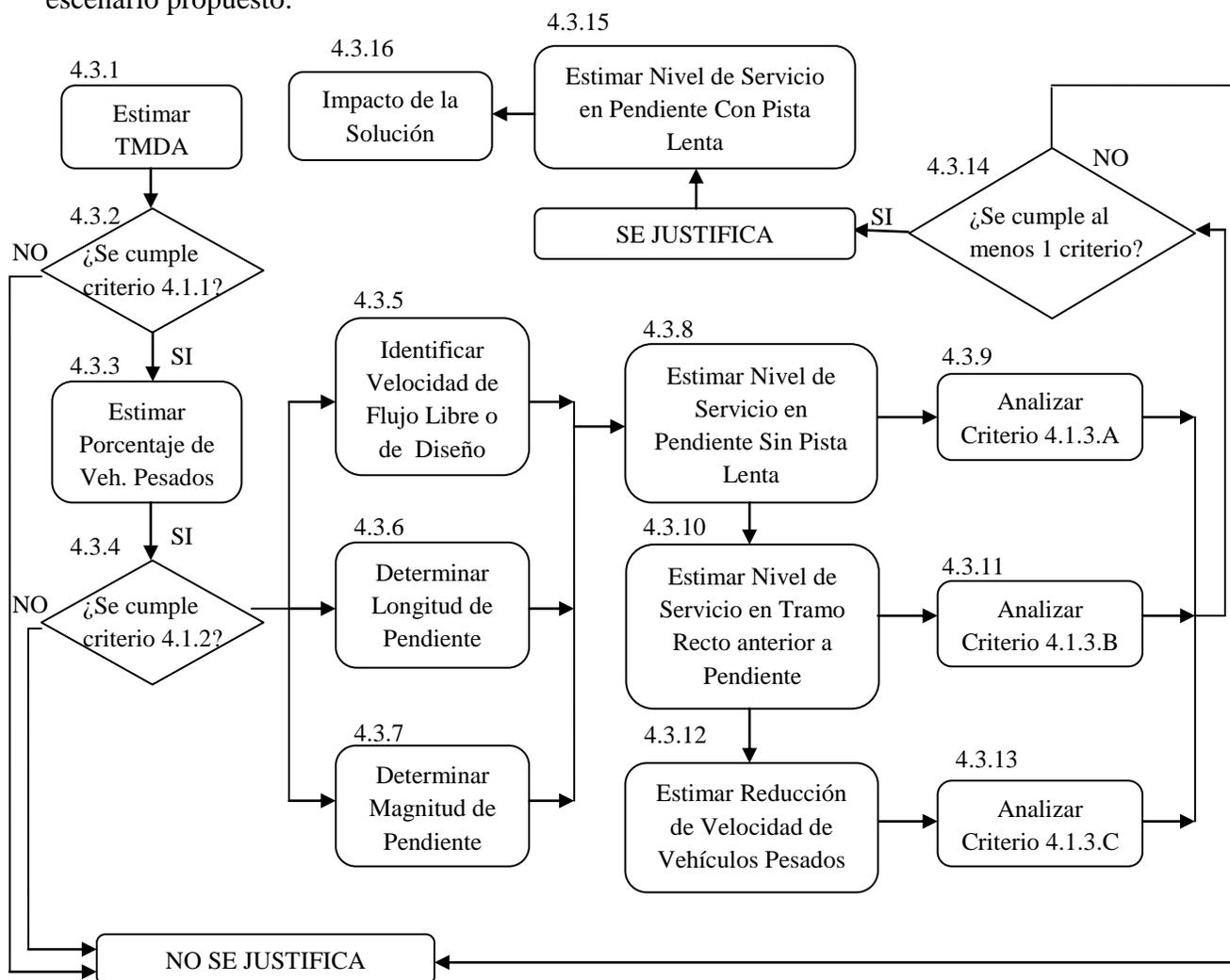
Para evaluar el criterio 4.1.3.C, se determinó la reducción de velocidad de los vehículos para cada uno de los escenarios de la matriz, en base a la Figura A2 del anexo A. Los resultados para cada escenario de la matriz de combinaciones se presentan en la Tabla D11 del Anexo D.

e) Nivel de Servicio en Pendiente con Pista Lenta

También se evaluó el Nivel de Servicio en Pendiente bajo la hipótesis de que a ésta se le agrega una pista adicional, con la finalidad de conocer la mejoría que ésta provocaría en cuanto a Nivel de Servicio. Lo anterior se determinó según HCM 2010, descrito en punto B1.2, de anexo B. Los resultados para cada escenario de la matriz de combinaciones se presentan en la Tabla D9 del Anexo D, mientras que las variables,  $V_{mv}$  y PTD, que permiten determinar dicho nivel de servicio se presentan en las Tablas D7 y D8 respectivamente, del mismo anexo.

### 4.3 Desarrollo de procedimiento para justificación de pista lenta

Para evaluar la justificación de implementar una pista lenta en pendiente, se propone el siguiente procedimiento, el cual utiliza las matrices mencionadas anteriormente para analizar cada escenario propuesto:



**Figura 5. Metodología para el Desarrollo del Procedimiento de Justificación de Pista Lenta**

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.1 Estimar TMDA

Éste antecedente se puede obtener a través de mediciones directas, o bien por datos históricos. Una fuente útil es el Plan de Censo de la Dirección de Vialidad que contiene antecedentes de TMDA para las distintas carreteras del país, medido cada dos años.

#### 4.3.2 ¿Se cumple criterio 4.1.1?

Con el antecedente de TMDA, que también puede ser medido en terreno, es posible determinar la cantidad de vehículos por hora. Una forma de realizarlo es a través de la ecuación 1, presente en

el numeral 3.102.304 del Volumen 3 del Manual de Carreteras. Se asume un coeficiente de 0.15 (valor representativo de tránsito presente en la Región).

$$VHD_{\text{año } i} = 0,12 \sim 0,18 \text{ del } TMDA_{\text{año } i} \quad (\text{Ec.1})$$

Luego, se corrobora el cumplimiento del criterio 4.1.1 para el posterior análisis de justificación de pista lenta.

#### 4.3.3 *Estimar Porcentaje de Vehículos Pesados*

Al igual que el ítem anterior, al realizar mediciones directas es posible identificar el tipo de vehículo que circula por el tramo estudiado, por lo que inmediatamente se puede obtener el porcentaje de vehículos pesados. En caso de no contar con datos de terreno, el Plan de Censos de la Dirección de Vialidad, contiene los antecedentes respectivos que igual pueden ser utilizados.

#### 4.3.4 *¿Se cumple criterio 4.1.2?*

Con el antecedente del porcentaje de vehículos pesados, se corrobora el cumplimiento del criterio 3.1.2 para el posterior análisis de justificación de pista lenta.

#### 4.3.5 *Identificar Velocidad de Flujo Libre o de Diseño*

Para el desarrollo del procedimiento, es imprescindible contar con la información de la velocidad del tramo en estudio. Ésta puede ser obtenida a partir de mediciones de velocidad de flujo libre ya sea con pistola laser, con seguimiento vehicular u otro método de medición. De no ser posible la medición, es posible asumir como velocidad de flujo libre la velocidad de diseño del tramo en estudio.

#### 4.3.6 *Determinar Longitud de Pendiente*

Se debe determinar la longitud de la pendiente, desde el inicio hasta el fin, es decir el tramo recto comprendido desde el fin de la primera curva vertical hasta el inicio de la segunda. Esto se puede obtener mediante topografía o bien en forma estimada con herramientas como por ejemplo GOOGLE EARTH.

#### 4.3.7 *Determinar Magnitud de Pendiente*

La magnitud de la pendiente se puede determinar mediante topografía, por diferencia de cotas, o en forma aproximada través de herramientas como por ejemplo GOOGLE EARTH. La modalidad de determinación dependerá del nivel de análisis que se esté llevando a cabo.

#### 4.3.8 *Estimar Nivel de Servicio en Pendiente Sin Pista Lenta*

Determinar Nivel de Servicio según HCM 2010, descrito en punto B1.1, de Anexo B. Al momento de acudir a las Tablas de datos del HCM se debe asumir condiciones de Pendiente. Los resultados para cada combinación de escenarios se presentan en la Tabla D6 del anexo D.

#### 4.3.9 *Analizar Criterio 4.1.3.A*

Con el antecedente de Nivel de Servicio en Pendiente, se corrobora el cumplimiento del criterio 3.1.3.A para el posterior análisis de justificación de pista lenta.

#### *4.3.10 Estimar Nivel de Servicio en Tramo Recto Anterior a Pendiente*

Determinar Nivel de Servicio según HCM 2010, descrito en punto B1.1, de Anexo B y al momento de acudir a las Tablas de datos del HCM, asumir condiciones de terreno a nivel. Los resultados para cada combinación de escenarios se presentan en la Tabla D3 del anexo D.

#### *4.3.11 Analizar Criterio 4.1.3.B*

Con el antecedente de Nivel de Servicio en Tramo Recto, en conjunto con la información obtenida en punto 4.3.8, se corrobora el cumplimiento del criterio 4.1.3.B, referente a la reducción de nivel de servicio, para el posterior análisis de justificación de pista lenta. Los resultados para cada combinación de escenarios se presentan en la Tabla D10 del anexo D.

#### *4.3.12 Estimar Reducción de Velocidad de Vehículos Pesados*

Se estima la reducción de velocidad de los vehículos pesados, según curvas de reducción de velocidad presentadas en Figura A2 de Anexo A. Los resultados para cada combinación de escenarios se presentan en la Tabla D11 del anexo D.

#### *4.3.13 Analizar Criterio 4.1.3.C*

Con el antecedente de la reducción de velocidad de los vehículos pesados, se corrobora el cumplimiento del criterio 4.1.3.C, para el posterior análisis de justificación de pista lenta.

#### *4.3.14 ¿Se cumple al menos 1 criterio?*

Luego del análisis de criterios, se concluye si se justifica o no, una pista lenta. Para ello se utiliza el procedimiento expuesto en la Figura 1.

#### *4.3.15 Estimar Nivel de Servicio en Pendiente Con Pista Lenta*

Se determina el Nivel de Servicio en caso de la instalación de una pista lenta, para analizar el beneficio que provocaría su instalación. Para ello se determina el Nivel de Servicio según HCM 2010, descrito en punto B1.2, de Anexo B. Los resultados para cada combinación de escenarios se presentan en la Tabla D9 del anexo D.

#### *4.3.16 Impacto de la solución*

Finalmente, se analiza cuanto mejorará el Nivel de Servicio en el tramo analizado al instalar una pista adicional para vehículos lentos.

#### **4.4 Limitaciones de procedimiento para justificación de pista lenta**

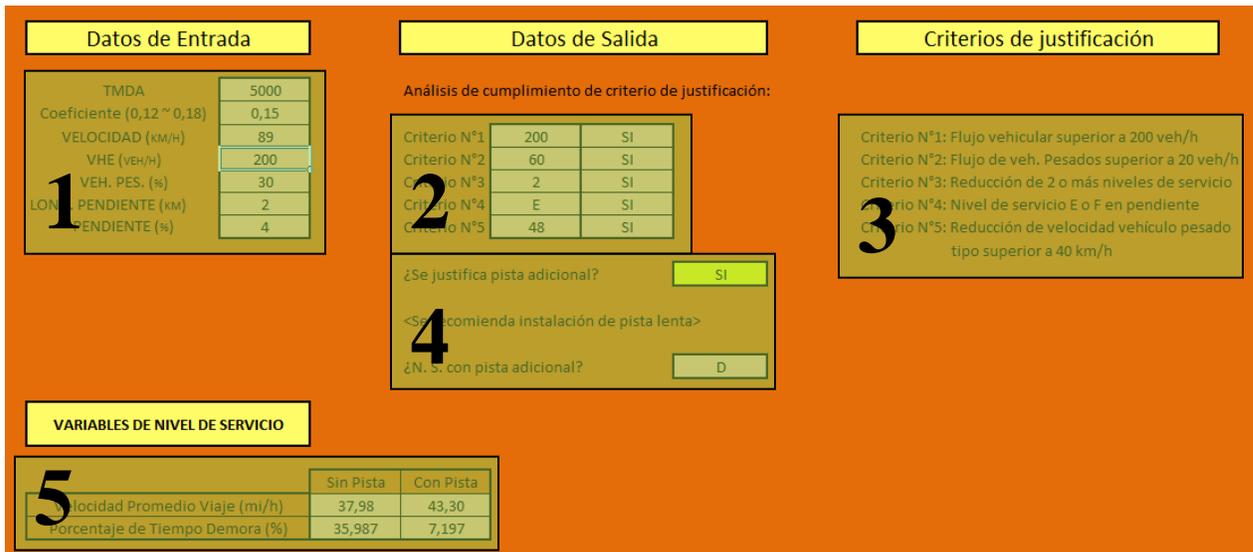
Si bien, el análisis realizado en esta investigación en conjunto con el procedimiento entregado es un gran aporte para efectos de justificación de pistas lentas, éste cuenta con algunas limitaciones en su aplicación. Éstas son:

- Se ha considerado una distribución de flujos en las pistas de 50/50: Se asumió una distribución vehicular 50/50, con la finalidad de reducir la amplitud de la investigación, además de ser una distribución típica de las carreteras de 2 pistas en Chile.
- Se ha considerado un ancho de pista 3,5m: Se trabajó con este ancho debido a que es el ancho comúnmente utilizado en el diseño de carreteras bidireccionales, recomendado por el Manual de Carreteras para velocidades entre 60 y 100 km/h.
- Velocidad de operación mayor o igual a 60 km/h: Se trabajó con velocidades de 60, 80 y 100 km/h para esta investigación, por lo que sólo se podrán obtener resultados para este rango de velocidades.
- Velocidad de entrada a pendiente 88 km/h: Al momento de determinar la reducción de velocidad de los vehículos al ingresar a la pendiente, se utilizan las curvas de reducción entregadas por el MCV3, los cuales contemplan una velocidad de entrada de 88 km/h.

#### 4.5 Automatización de procedimiento para justificación de pista lenta

Como se mencionó anteriormente, se construyeron cinco matrices asociadas a los niveles de servicio y reducciones de velocidad en el tramo de estudio. En cada matriz cada celda de combinación representa un escenario en el que se evalúan los criterios para la justificación de una pista adicional. El desarrollo de cálculos a través de matrices se observa en Anexo D.

Para facilitar el análisis y la aplicación del procedimiento descrito en 4.3 se desarrolló un programa en Excel, que permite automatizar el procedimiento para evaluar los criterios de justificación de pistas lentas. La Figura 6 muestra la pantalla principal del programa desarrollado.



**Figura 6. Programa en Excel para evaluación de pista adicional**

La descripción de cada una de las áreas es la siguiente:

- Sector 1: En este sector, se ingresan los datos de entrada (volumen vehicular, velocidad, porcentaje de vehículos pesados, longitud y magnitud de pendiente).
- Sector 2: En el sector 2, se presentan los resultados de la evaluación de los criterios, los cuales son buscados en las matrices de escenarios a partir de los datos de entrada. Se entrega el valor para cada criterio (definidos en el sector 3), y además muestra si éste se cumple con un “SI” o un “NO”.
- Sector 3: En esta parte del programa, se presentan los criterios ya definidos anteriormente. Con la finalidad de que el usuario tenga conocimiento del cumplimiento o incumplimiento de los criterios establecidos.

- Sector 4: Posteriormente, según la información entregada en el punto 2, referente al cumplimiento de criterios, se entrega un “SI” en caso de que se justifique una pista adicional y un “NO” en caso contrario. Además se presenta el nivel de servicio que tendría el segmento al ser hipotéticamente incorporada una pista adicional, a razón de tener nociones del beneficio que tendría su incorporación.
- Sector 5: Finalmente se entregan los valores de las variables que determinan el nivel de servicio según la metodología del HCM 2010, a fin de evaluar la variación de las cifras teniendo y no teniendo pista adicional. Esto también permitirá una evaluación económica de la pista lenta.

## 5 APLICACIÓN DE PROCEDIMIENTO AUTOMATIZADO A CASOS REALES

Con la finalidad de evaluar el procedimiento automatizado presentado en el capítulo 4, se realizó una aplicación a 3 casos reales, pertenecientes a tramos de carretera de la Región del Bío Bío. Dos de ellos cuentan actualmente con pista adicional, mientras que el otro no, por lo que se evaluará si se justifica su instalación en los primeros la pertinencia de la pista lenta, mientras que el último caso se evaluará si se justifica.

Los antecedentes de geometría de cada tramo se obtuvieron de la aplicación Google Earth, mientras que los antecedentes de tránsito, se obtuvieron de la información entregada por la Dirección de Vialidad, para el censo de tránsito 2010.

### 5.1 Identificación y Descripción de Casos a Analizar

La Figura 7, presenta la ubicación de los tramos analizados, uno de ellos pertenecientes a la Ruta Q-60 y los otros a la Ruta 156.



Figura 7. Ubicación de tramos en estudio

### 5.1.1 Caso 1(Con pista lenta): Ruta O-50 (Cabrero-Concepción)

El Caso N°1 (Ver Figura C1 de Anexo C), pertenece a un segmento de la Ruta O-50, el cual posee una pista adicional para tránsito lento cuya longitud es de 352 m, con una pendiente aproximada de 7,7%, ascendente en dirección a Concepción. Los antecedentes de tránsito se presentan en la Tabla C1 de Anexo C, correspondientes al segmento entre la estación 61 y 58 de la información de tránsito entregada por la Dirección de Vialidad.

### 5.1.2 Caso 2(Con pista lenta): Ruta 156(Nacimiento-Concepción)

El caso N°2 (Ver Figura C3 de Anexo C), se ubica en un segmento de la Ruta 156. Éste posee una pista adicional para tránsito lento, cuya longitud es de 1070 m con una pendiente aproximada de 7%, ascendente en dirección a Santa Juana. Los antecedentes de tránsito se presentan en la Tabla C5 del Anexo C, correspondientes al segmento entre la estación 84 y 75 de la información de tránsito entregada por la Dirección de Vialidad.

### 5.1.3 Caso 3(Sin pista lenta): Ruta 156(Nacimiento-Concepción)

El caso N°3 (Ver Figura C5 de Anexo C), pertenece a un segmento de la Ruta 156 con pendiente ascendente en dirección a Nacimiento de 7% aproximadamente, con una longitud de 359 m y que inicia en el Km 87 de dicha ruta. Los antecedentes de tránsito se presentan en la Tabla C9 de Anexo C, pertenecientes al tramo desde estación 84 a Nacimiento.

## 5.2 Aplicación de Procedimiento Automatizado

A continuación se presentan los datos iniciales, en conjunto con el resultado entregado por el procedimiento automatizado.

### 5.2.1 Caso 1(Con pista lenta): Ruta O-50 (Cabrero-Concepción)

Antecedentes:

- TMDA: 6054 veh/día (ambas pistas)
- Porcentaje de vehículos pesados: 16%
- Longitud de pendiente: 353 m
- Magnitud de pendiente: 8%
- Velocidad de proyecto: 100 km/h

El resultado del análisis del Tramo 1, se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3. Resultado de procedimiento automatizado para Tramo 1**

Criterio	Valor	Cumplimiento
Flujo vehicular superior a 200 veh/h:	454	SI
Flujo de vehículos pesados en subida superior a 20 veh/h	77	SI
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	>40	SI
Nivel de Servicio en pendiente E o F	C	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO

Nota: La imagen de los resultados arrojados por el programa se presentan en Anexo C

De los resultados arrojados por el procedimiento automatizado, se justifica una pista adicional debido al cumplimiento de los criterios necesarios para ello.

### 5.2.2 Caso 2 (Con pista lenta): Ruta 156(Nacimiento-Concepción)

Antecedentes:

- TMDA: 1831 veh/día (ambas pistas)
- Porcentaje de vehículos pesados: 14%
- Longitud de pendiente: 1070 m
- Magnitud de pendiente: 7%
- Velocidad de proyecto: 100 km/h

El resultado del análisis del Tramo 2, por el procedimiento automatizado se presenta en la Tabla 4.

**Tabla 4. Resultado de procedimiento automatizado para Tramo 2**

Criterio	Valor	Cumplimiento
Flujo vehicular superior a 200 veh/h:	137	NO
Flujo de vehículos pesados en subida superior a 20 veh/h	19	NO
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	55	SI
Nivel de Servicio en pendiente E o F	B	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO

Nota: La imagen de los resultados arrojados por el programa se presentan en Anexo C

De los resultados arrojados por el procedimiento automatizado, se cumple el criterio de justificación por la reducción de velocidad de vehículos pesados, pero no se cumple los 2 criterios obligatorios referidos a volumen vehicular y de vehículos pesados.

### 5.2.3 Caso 3 (Sin pista lenta): Ruta 156(Nacimiento-Concepción)

Antecedentes:

- TMDA: 1903 veh/día (ambas pistas)
- Porcentaje de vehículos pesados: 24%
- Longitud de pendiente: 359 m
- Magnitud de pendiente: 7%
- Velocidad de proyecto: 100 km/h

El resultado del análisis de los valores realizado para el Tramo 3, por el procedimiento automatizado se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5. Resultado de procedimiento automatizado para Tramo 3**

Criterio	Valor	Cumplimiento
Flujo vehicular superior a 200 veh/h:	143	NO
Flujo de vehículos pesados en subida superior a 20 veh/h	34	SI
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	30	NO
Nivel de Servicio en pendiente E o F	B	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO

Nota: La imagen de los resultados arrojados por el programa se presentan en Anexo C

De los resultados arrojados por el procedimiento automatizado, se cumple el criterio de justificación por la cantidad de vehículos pesados presentes en la vía, sin embargo no es suficiente para justificar la construcción de una pista adicional.

### 5.3 Verificación con metodología directa de HCM 2010

Para realizar una validación del programa en Excel, se analizan los 3 casos, de forma directa mediante HCM 2010, cuyo desarrollo se encuentra en el Anexo C.

Los resultados del análisis para cada uno de los tramos 1, 2 y 3 se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6. Resultado de cálculos directos para Tramo 1, 2 y 3**

Criterio	Caso 1		Caso 2		Caso 2	
	Valor	Cumplimiento	Valor	Cumplimiento	Valor	Cumplimiento
Flujo vehicular superior a 200 veh/h:	454	SI	137	NO	143	NO
Flujo de vehículos pesados en subida superior a 20 veh/h	77	SI	19	NO	34	SI
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	40	SI	56	SI	32	NO
Nivel de Servicio en pendiente E o F	D	NO	B	NO	B	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO	0	NO	0	NO

De los resultados obtenidos por cálculo directo se tiene que se justifica una pista adicional en el Caso 1, mientras que en los Casos 2 y 3, si bien cumple con uno de los criterios, esto no es suficiente para la instalación de una pista adicional.

De la Tabla 7, se observa la similitud de los resultados entregados por el procedimiento automatizado versus el cálculos directo, la comparación de TMDA y porcentaje de vehículos pesados no es necesario, puesto que no hay variación en los cálculos de los métodos presentados.

**Tabla 7. Comparación resultados por Casos**

Criterio	Proc. Automatizado		Metodología directa	
	Valor	Cumplimiento	Valor	Cumplimiento
<b>CASO 1</b>				
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	>40	SI	40	SI
Nivel de Servicio en pendiente E o F	C	NO	D	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO	0	NO
<b>CASO 2</b>				
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	55	SI	56	SI
Nivel de Servicio en pendiente E o F	B	NO	B	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO	0	NO
<b>CASO 3</b>				
Reducción de velocidad de camión tipo (122 kgf/kw) superior a 40 km/h	30	NO	32	NO
Nivel de Servicio en pendiente E o F	B	NO	B	NO
Reducción de dos o más niveles de servicio al entrar a la pendiente	0	NO	0	NO

De las Tabla 7, se observa la similitud entre los resultados, por lo que se valida el procedimiento mediante la herramienta Excel.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

En esta investigación, se definió un procedimiento, que posteriormente se automatizó, para evaluar la justificación de una pista adicional para tránsito lento en una carretera de dos pistas bidireccional con pendiente ascendente. Este procedimiento es una herramienta que facilita la evaluación de los criterios de justificación, mediante el análisis de escenarios realizado a través de matrices de combinación de variables.

Para realizar dicho análisis, se identificaron las variables que influyen en la evaluación de una pista adicional. Estas variables son: magnitud y longitud de pendiente, flujo vehicular, porcentaje de vehículos pesados y velocidad de flujo libre.

Luego de la revisión bibliográfica, se seleccionaron como criterios de justificación de pista lenta el flujo vehicular, el flujo de vehículos pesados, la reducción de velocidad de vehículos pesados, el nivel de servicio en pendiente y la reducción de nivel de servicio en tramos adyacentes.

En cuanto a los criterios analizados, se verificó que en Chile a través del MCV3, sólo se entregan algunas recomendaciones generales que concluyen en realizar un estudio técnico-económico para evaluar la justificación de una pista adicional, sin embargo no se propone una metodología para dicha evaluación. Por otro lado, de las normativas internacionales se verificó la importancia del nivel de servicio en la justificación de una pista adicional. Es por ello, que se trabajó con la metodología del HCM 2010 para realizar dicho cálculo en los distintos escenarios de la matriz de combinaciones.

Respecto a los criterios de justificación, esta investigación se basa en una comparación de criterios entregados por las normativas analizadas, de las que resulta:

Se justifica una pista adicional cuando:

1. Flujo vehicular sea superior a 200 veh/h
2. Flujo de vehículos pesados superior a 20 veh/h
3. Cualquiera de las siguientes condiciones:
  - Reducción de 2 niveles de servicio en tramos adyacentes (antes de pendiente y en pendiente).
  - Nivel de Servicio E o F en pendiente
  - Reducción de velocidad de vehículos pesados superior a 40 km/h

Del procedimiento propuesto se concluye:

- Se propone un procedimiento basado en 5 criterios: Volumen vehicular (V), Volumen de vehículos pesados (Vc), Nivel de Servicio en Pendiente, Reducción de Nivel de Servicio y Reducción de Velocidad de vehículos pesados.
- El análisis de Nivel de Servicio, se basó en la metodología expuesta en el HCM 2010.
- Para facilitar el análisis de criterios de justificación, se desarrollaron matrices que permiten combinar las variables influyentes, y así analizar cada uno de los escenarios.
- Se desarrolló un programa computacional para automatizar el análisis y facilitar la entrega de información respecto a la evaluación de justificación de pistas lentas.

Para validar el procedimiento expuesto en esta investigación, éste se aplicó a 3 casos, 2 de los cuales poseen pista adicional, evaluando la justificación de pista lenta bajo las condiciones imperantes en el sector. El tercer caso es un segmento sin pista adicional con una pendiente ascendente al que se analizó, según condiciones físicas y operacionales, la justificación de una pista adicional.

Cada uno de los casos, se analizó bajo el procedimiento automatizado y bajo cálculos directos, con la finalidad de validar dicho procedimiento.

Respecto a la aplicación en casos reales se tiene:

- Caso 1: Actualmente existe una pista adicional, lo que es respaldado por el procedimiento de esta investigación que cumple con 3 criterios de la metodología, justificando la existencia de la pista lenta. Además los resultados entregados por cálculo directo son bastante similares a los entregados por el programa, lo que respalda la justificación en conjunto con validar el procedimiento. Cabe señalar que sin pista adicional el segmento, bajo las condiciones entregadas en el capítulo 4, posee un nivel de servicio D en la pendiente, mientras que con pista adicional el nivel de servicio es B. De lo anterior, se tiene que la incorporación de la pista lenta mejora el nivel de servicio de la carretera.
- Caso 2: Actualmente existe una pista adicional, sin embargo según procedimiento automatizado ésta no se justificaría, lo que es avalado por el cálculo directo que entrega resultados similares. Esto se debe a la cantidad de vehículos que circula por el sector, cuyo valor está por debajo de lo que entregan los criterios como justificación. El criterio que si la justifica es la reducción de la velocidad de los vehículos que esta por sobre los 50 km/h, por lo que se recomienda verificar el flujo vehicular en terreno con mediciones

directas (ya que las usadas para esta investigación pertenecen al CENSO 2010), para saber si se justifica realmente. Es importante destacar que al adicionar una pista adicional el nivel de servicio no aumenta, se mantiene en B. Según lo expuesto, en este tramo no se justifica una pista adicional bajo los criterios, además de no proporcionar ningún beneficio en cuanto a nivel de servicio.

- Caso 3: Según procedimiento automatizado y por cálculo directo, en este tramo no se justifica pista adicional. Sólo cumple el criterio por flujo de vehículos pesados, sin embargo no es suficiente para incorporar una pista lenta. Además de no proporcionar ningún beneficio en cuanto a nivel de servicio al incorporarla, debido a que éste se mantiene en B.

De la aplicación a casos reales, se observa que el procedimiento automatizado entrega información muy similar a los resultados entregados por cálculo directo, por lo que se concluye que es una herramienta útil que entrega una respuesta preliminar de forma más rápida respecto a la justificación y evaluación de pista lenta., además de evaluar también la variación del nivel de servicio al momento de instalar una pista adicional, con la finalidad de saber cuál será el beneficio en cuanto a la percepción del conductor al momento de instalarla.

## **6.2 Recomendaciones**

- Es recomendable perfeccionar la herramienta entregada por esta investigación, que si bien contempla muchas combinaciones, aún son pocas en cuanto a la gama de posibilidades que puede generar el combinar las variables involucradas. Como se expresó en las conclusiones, las variaciones en cuanto a resultados con cálculo directo son mínimas, por lo que aumentar la matriz de combinaciones permitiría resultados mayormente exactos y confiables.
- Respecto a lo anterior, los intervalos utilizados pueden ser ampliados, puesto que para efectos de esta investigación se trabajó sólo con condiciones prevalecientes en la Región del Bio Bio.
- Se recomienda, de igual forma, contrastar los resultados de esta investigación con una evaluación de los beneficios y costos involucrados en la implementación de pista lenta, para distintas sensibilizaciones de variables.

## 7 REFERENCIAS

- AASHTO (2001), A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington, D.C.
- AUSTROADS (2009), Part 3: Geometric Design, Guide to Road Design, Australia.
- Arellano, D. (2011). Análisis de Perfiles de Velocidad de Camiones en Pendientes Ascendentes. Tesis, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile.
- DGC (2011), Instrucción de Carreteras Norma 3.1-IC: Trazado, Dirección General de Carreteras, España.
- HCM (2010). Highway Capacity Manual, Chapter 15: Two-Lane Highways, Estados Unidos.
- INVIAS (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, Instituto Nacional de Vías, Colombia.
- Mejías, A. (2012). Caracterización de la velocidad deseada en rectas para carreteras de dos pistas. Tesis, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile.
- MOP (2012), Instrucciones y Criterios de Diseño, Manual de Carreteras Volumen 3, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Chile.
- MOP (2010), Plan de Censo: Información de tránsito, Dirección de Vialidad, Ministerios de Obras Públicas. <http://servicios.vialidad.cl/censo/index.htm> [Acceso el 14 de Febrero de 2013.]
- MTC (2001), Manual de Diseño Geométrico para Carreteras, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Perú.
- TRANSIT (2002), State Highway Geometric Design Manual, Section 5: Vertical Alignment, Nueva Zelanda.
- Valdebenito, C. (2001), Caracterización de la red vial básica en la Región del Bío Bío. Tesis, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío, Chile.