

UNIVERSIDAD DEL BÍO – BÍO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Sergio Vargas Tejada

**ANÁLISIS DE CONSISTENCIA EN EL
DISEÑO GEOMETRICO DE CURVAS
SUCEIVAS INVERSAS**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS PARA
OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

GIOVANNA EMELINA GALLEGOS ACEVEDO

CONCEPCIÓN, SEPTIEMBRE DEL 2013

NOMENCLATURA.

- MCV3 : Manual de Carreteras Volumen 3.
- AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- R_1 : Radio de Entrada.
- R_2 : Radio de Salida.
- V_{85} : Velocidad de Operación, percentil 85.
- V_{85}^1 : Velocidad de Operación, percentil 85 de la curva de entrada.
- V_{85}^2 : Velocidad de Operación, percentil 85 de la curva de salida.
- V_D : Velocidad de Diseño.
- ΔV : Diferencia de Velocidad.
- $TL_{m\acute{a}x}$: Longitud Tangente Máxima.
- $TL_{m\acute{i}n}$: Longitud Tangente Mínima.
- TL_{crit} : Longitud Tangente Crítica.
- f_D : Fricción de Diseño.
- F_d : Fricción de demanda.
- CI UP: Límite inferior de cumplimiento de Criterio I de Lamm.
- CI DOWN: Límite superior de cumplimiento de Criterio I de Lamm.
- CI UP: Límite inferior de cumplimiento de Criterio II de Lamm.
- CI DOWN: Límite superior de cumplimiento de Criterio II de Lamm.

DEDICATORIA

A mi familia, a mi novio y a los
que nunca dejaron de confiar en mí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por permitirme llegar hasta estas instancias, por su bondad, su amor y por no abandonarme ni en los momentos más difíciles.

Agradezco especialmente al profesor Sergio Vargas, por ser mi gran guía en este proceso, que con su paciencia y entusiasmo hizo de esta larga tarea una experiencia enriquecedora.

A mi familia; mis padres, que con su cariño, su apoyo y sus fuerzas me ayudaron a nunca darme por vencida y sentir que siempre podía contar con su ayuda. A mis hermanos que siempre se preocuparon por mí, aún en la distancia. A mis sobrinos que a su corta edad sabían que estaba viviendo un proceso importante en mi vida por lo que me entregaban todo su amor.

A David, por ser el pilar fundamental en mi vida y durante el transcurso de esta memoria de título, por su paciencia, sus enseñanzas y su amor incondicional.

A mis amigas y amigos por darme ánimo cuando decaía y porque nunca dejaron que me rindiera, en especial a mi gran amiga Camila.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterios de Lamm.....	7
Tabla 2: Modelos de velocidad de operación de Díaz	12
Tabla 3: Rangos de radios y velocidad deseada.	14
Tabla 4: Resultados para R1 fijo y R2 variable.....	19
Tabla 5: Resultados para un R1 variable y R2 fijo.....	21
Tabla 6: Comparación entre longitudes de tangente mínimas	22
Tabla 7: Comparación entre longitudes de tangente máximas.....	23
Tabla 8: Radios mínimos propuestos por el MCV3	23

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Esquema de Metodología Utilizada.....	4
Figura 2: Perfiles de velocidad de $TL_{m\acute{a}x}$ y $TL_{m\acute{i}n}$	9
Figura 3: Perfil de velocidad de operación en curvas sucesivas (Díaz, 2012).	10
Figura 4: Configuración de curva sucesiva utilizada.....	13
Figura 5: Rango de valores para aceleración y deceleración. (Basualto, 2003).....	15
Figura 6: Diagrama de iteraciones	16
Figura 7: Gráfico tipo de resultados.....	18
Figura 8: Gráfico de resultados para $V_D=80$ Km/hr y $R_1=200$ m.....	20
Figura 9: Ábaco de relación entre radios consecutivos.....	24

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Alcances	3
1.4 Metodología	3
1.4.1 Etapa 1: Revisión Bibliográfica	4
1.4.2 Etapa 2: Diseño Matriz de Escenarios.....	4
1.4.3 Etapa 3: Análisis de Consistencia	4
1.4.4 Etapa 4: Análisis de Resultados	5
1.4.5 Etapa 5: Aplicaciones	5
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Consistencia en el Diseño	6
2.2 Criterios de Consistencia	7
2.3 Curvas Sucesivas	8
2.4 Consistencia en las Normativas de Diseño	9
2.5 Modelos de Velocidad de Operación en Curvas Sucesivas	10
2.6 Modelo de Velocidad de Díaz	11
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CONSISTENCIA.....	13
3.2 Modelo General de Diseño	13
3.3 Variables de Estudio	13
3.2.1 Velocidad Deseada.....	13

3.2.2 Radio	14
3.2.3 Velocidad Específica.....	14
3.2.4 Aceleración y Deceleración	14
3.2.5 Longitud de Tangente.....	15
3.3 Metodología Aplicada.....	15
3.4 Resultados Obtenidos	17
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	19
4.1 Análisis para un R1 Fijo y un R2 Variable	19
4.2 Análisis para un R2 Fijo y un R1 Variable	20
4.3 Síntesis de Resultados.....	21
CAPÍTULO V: ANALISIS COMPARATIVO CON NORMATIVA NACIONAL	22
5.1 Longitud de Tangente Mínima	22
5.2 Longitud de Tangente Máxima	22
5.3 Radio Mínimo	23
5.4 Relación entre Radios Consecutivos.	23
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	28
ANEXOS.....	31

ANÁLISIS CONSISTENCIA EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS SUCESIVAS INVERSAS

Autor: Giovanna Gallegos Acevedo

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BíoBío

giovanna.ingcivil@gmail.com

Profesor Patrocinante: Dr. Sergio Vargas

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del BíoBío

svargas@ubiobio.cl

RESUMEN

La consistencia en el diseño geométrico tiene directa relación con la seguridad que presenta un diseño vial. En particular, para curvas sucesivas inversas, la consistencia puede evaluarse en función de la velocidad de diseño y las velocidades de operación, para lo cual existen criterios de consistencia que definen si el diseño es bueno, regular o pobre. El volumen 3 del Manual de Carreteras en Chile (MCV3) no incorpora explícitamente criterios de análisis de consistencia en el diseño de curvas sucesivas, sino que sólo recomienda una relación entre radios de entrada y radios de salida. Esto no necesariamente asegura consistencia, dado que se omite del análisis la longitud de tangente intermedia, la que influye directamente en las velocidades de operación.

En este trabajo, se analizó la consistencia del diseño geométrico de curvas sucesivas inversas para distintas configuraciones (R_1 - T_L - R_2) y se contrastaron los resultados con las recomendaciones de diseño nacionales. Para ello, se evaluó un total de 133 escenarios de diseño, considerando velocidades deseadas de 80, 90 y 100 Km/hr, un rango de 7 radios de entrada y 7 radios de salida y diferentes longitudes de tangente intermedias.

Los resultados indican que en diseños consistentes, tanto los radios de entrada como los de salida son inversamente proporcionales a la longitud de tangente intermedia. Además se recomienda acotar el ábaco de relaciones entre radios sucesivos, propuesto por el MCV3, dado que valores extremos no aseguran consistencia en el diseño.

Palabras clave: Consistencia, Curvas Sucesivas, Tangente Intermedia.

ABSTRACT

The geometric design consistency is directly related to security that presents a road design. In particular, successive reverse curves, consistency can be evaluated based on the design speed and operating speeds, for which there are consistency criteria that define whether the design is good, fair or poor. Volume 3 of the Chilean Highway Manual Design (MCV3) does not explicitly incorporate a consistency criteria for curves geometric design standard, but need only recommends a relationship between input and radius output. This does not necessarily ensure consistency, given that the analysis is omitted the intermediate tangent length, which directly influences the speed of operation.

In this research, we analyzed the geometric design of consistency for reverse successive curves considering different configurations (R1-TL-R2) and contrasted the results with national design recommendations. To reach this, we evaluated a total of 133 design scenarios considering desired speeds of 80, 90 and 100 km / hr, a range of 7 radius of input and 7 of output and intermediate tangent different lengths.

The results show that in consistent designs, imply that both radius input and output are inversely proportional to the length of intermediate tangent. It is also recommended limit the abacus relations between successive radius proposed by the MCV3, given that high values do not ensure consistency in design.

Keywords: Consistency, Successive curves, Tangent Intermedia.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el contexto del estudio, el significado de consistencia en el diseño geométrico y sus criterios de aplicación. Además se mencionan los objetivos de la investigación y se detalla la metodología empleada para cumplir estos objetivos.

1.1 Contexto

La consistencia del diseño geométrico de una vía tiene relación con la homogeneidad de los elementos geométricos que la componen. Se puede afirmar que, un diseño consistente será aquel que se encuentre acorde a las expectativas del conductor a lo largo de todo su trazado (Irizarry and Krammes, 1998). De esta manera estos evitan maniobras críticas que pueden resultar en accidentes

El análisis de consistencia en el diseño geométrico es importante, ya que diversos estudios han demostrado que caminos inconsistentes tienen mayor frecuencia de accidentes. Por lo tanto la consistencia en el diseño tiene directa relación con la seguridad vial. Messer (1980) postula que los diseños inconsistentes aumentan la carga mental del conductor reduciendo la eficiencia de su desempeño y por tanto aumentando el riesgo de accidentes. Lamm et al (2000), estableció que existe una fuerte incidencia en los accidentes en curvas horizontales, cuando no se cumplen las expectativas que el conductor tiene del camino, lo que conlleva a grandes diferencias entre las velocidades de operación y las velocidades de diseño.

Existen diversos análisis mediante los cuales se puede medir la consistencia de un diseño geométrico: el análisis de consistencia basado en las diferencias de velocidades y el análisis de consistencia basado en la carga mental (Echaveguren et al, 2001). Éste último es complejo de medir ya que depende de factores propios de cada individuo como el ritmo cardiaco, la presión arterial, el tiempo de respuesta, la visión, etc., como también de factores externos como el ambiente de conducción. Los métodos de análisis de la consistencia basados en la velocidad indican que grandes diferencias entre la velocidad de operación (V_{op}), aquella a la cual circulan los conductores, y la velocidad de diseño, provocan mayor inconsistencia en el diseño. Krammes (1995) investigó este comportamiento, concluyendo que en caminos con velocidades de diseño inferiores a 90 Km/hr, las velocidades de operación superan a la velocidad de diseño, lo cual es contradictorio con la definición de velocidad de diseño (V_d): “la máxima velocidad segura que

puede mantenerse en una sección de un camino cuando las condiciones son tan favorables que sólo la condicionan las características del diseño” (Fitzpatrick et al , 2000), demostrando que los supuestos teóricos difieren de la práctica, debido esencialmente a la respuesta de los conductores a la geometría de una vía. McLean (1981), por su parte, indica que grandes diferencias entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación causan inconsistencias que elevan el riesgo de accidentes.

Lamm et al (2000) estableció que existe una fuerte incidencia en los accidentes en las curvas horizontales, cuando no se cumplen las expectativas que el conductor tiene del camino, y esto conlleva a grandes diferencias de velocidad. Lamm propone criterios para el análisis de la consistencia en diseño, los que son aplicados a curvas aisladas simples y curvas compuestas. En el primer caso el indicador es la diferencia entre la velocidad de operación y la velocidad de diseño. En el segundo caso el indicador es la diferencia entre las velocidades de operación de curvas sucesivas. Polus (2000) también propone un análisis de consistencia basado en las diferencias de velocidad de operación, pero a diferencia de Lamm, Polus analiza el trazado completo, respecto de una velocidad de operación promedio.

A nivel internacional pocas son las normativas que consideran la consistencia en la etapa de diseño verificando algún criterio como los de Lamm o Polus. En particular la normativa Chilena (MCV3, 2008) no incorpora explícitamente criterios de consistencia tanto para el diseño de curvas aisladas o curvas sucesivas. En el caso particular de las curvas sucesivas inversas recomienda seleccionar radios de entrada y salida según ábacos de diseño. En el caso de que la tangente intermedia sea menor a 400 m, sin especificar mayormente la naturaleza y/u origen de esta recomendación. Tampoco se verifica si corresponde a curvas simples o compuestas. Esta recomendación de diseño debe ser verificada debido a que la experiencia internacional indica que la dependencia entre curvas sucesivas obedece tanto a la velocidad de operación en las curvas como a la longitud tangente necesaria para que el conductor logre acelerar o decelerar dentro de esta configuración geométrica.

Por lo anterior este trabajo se aboca en analizar la consistencia del diseño en curvas sucesivas inversas de modo de verificar los criterios propuestos en el MCV3 considerando los criterios de consistencia propuestos por Lamm.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar la consistencia del diseño geométrico de curvas sucesivas inversas para distintas configuraciones ($R_1-T_L-R_2$) y contrastar estos resultados con las recomendaciones de diseño nacionales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Sintetizar los criterios de análisis de consistencia y de diseño geométrico de curvas sucesivas considerados en diversas normativas de diseño.
- Generar distintos escenarios de diseño para la verificación de la consistencia en curvas sucesivas.
- Evaluar la consistencia en los escenarios propuestos en base a modelos de velocidad calibrados en Chile.
- Construir ábacos de diseño en base a la evaluación de escenarios.
- Aplicar los resultados obtenidos en la verificación de la consistencia de las recomendaciones de diseño del MCV3.

1.3 Alcances

- Este estudio considera sólo caminos locales y colectores, debido a que estudios indican que en caminos cuya velocidad de diseño es inferior a 90 Km/hr, se producen las mayores inconsistencias.
- El Análisis de consistencia en el diseño geométrico se realizará mediante los criterios I y II de Lamm.

1.4 Metodología

La Figura 1 presenta el esquema metodológico utilizado en este estudio.

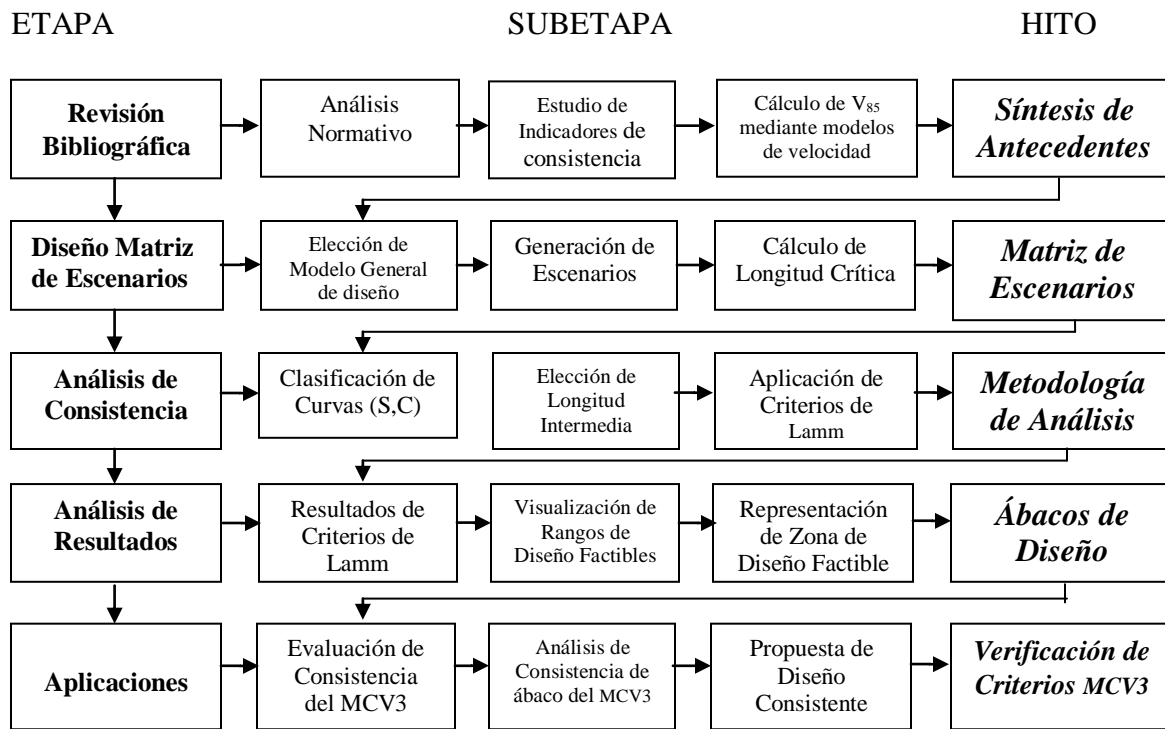


Figura 1: Esquema de Metodología Utilizada

1.4.1 Etapa 1: Revisión Bibliográfica

Esta etapa consiste en realizar una síntesis de los criterios de análisis de consistencia y de diseño geométrico de curvas sucesivas considerados en diversas normativas de diseño, mediante un análisis de normativa de diseño tanto nacional como extranjera. También se realiza una descripción y síntesis de indicadores de consistencia y modelos de velocidad de operación en curvas sucesivas.

1.4.2 Etapa 2: Diseño Matriz de Escenarios

Esta etapa consiste en generar una matriz de escenarios para la verificación de la consistencia en curvas sucesivas considerando distintas combinaciones de radio de entrada, longitud tangente y radio de salida.

1.4.3 Etapa 3: Análisis de Consistencia

Luego de creada la matriz de escenarios, se determina la longitud de tangente crítica para establecer si corresponde a curvas simples o compuestas. Dependiendo de esta clasificación se procede a evaluar el criterio I y/o II de Lamm según corresponda y se construyen ábacos de diseño que permiten evaluar los criterios de acuerdo a distintos R_1 , R_2 y TL. Estos resultados se

sintetizan en gráficos donde se pueden observar los rangos de diseño factibles, los cuales se implementan en ábacos de diseño.

1.4.4 Etapa 4: Análisis de Resultados

Esta etapa se refiere al análisis de los resultados obtenidos y de los ábacos encontrados en la etapa anterior. Se realiza un análisis comparativo para diferentes velocidades y se sintetizan los principales resultados encontrados estableciendo propuestas de diseño.

1.4.5 Etapa 5: Aplicaciones

Esta etapa consiste en contrastar los resultados obtenidos en análisis de consistencia, con las recomendaciones de diseño del MCV3.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presentan los conceptos básicos asociados a esta investigación. Esencialmente se analizan los conceptos de consistencia en el diseño y sus criterios de aplicación, se describen las curvas sucesivas y su clasificación, así como también modelos de velocidad para curvas sucesivas. Además se realiza una comparación entre las recomendaciones de diseño del MCV3 y normativas extranjeras.

2.1 Consistencia en el Diseño

La consistencia del diseño geométrico de una vía se entiende como la homogeneidad geométrica de los elementos que la componen. Cuando un conductor recorre un tramo de vía, espera que sus elementos sean de lo más uniformes, ya que cambios repentinos de los mismos pueden producir situaciones inseguras que se traducen en accidentes.

Gran parte de las normativas de diseño entregan procedimientos para la elección de los elementos geométricos mínimos que componen una vía. Para el alineamiento horizontal se proporcionan recomendaciones según la velocidad de diseño: selección de radio, factor de fricción y peralte. Sin embargo, diversos estudios han demostrado debilidades de los métodos basados en la velocidad de diseño (McLean, 1980), ya que no incorporan el concepto de consistencia explícitamente. No obstante, durante el proceso de diseño, es necesario anticipar la interacción de los elementos de la carretera, con la operación vehicular y el entorno, con la finalidad de lograr un diseño consistente que cumpla con las expectativas del conductor en la ruta. En las últimas décadas se han documentado estudios en Australia (McLean, 1981), Estados Unidos (Krames, 1995), Chile (Echaveguren y Sáez, 2001) y otros, que demuestran que los conductores superan las velocidades de diseño cuando éstas están bajo los 90 Km/hr. Un estudio realizado en los Estados Unidos demostró que en curvas que obligan a decelerar más de 20 Km/hr, la posibilidad de sufrir accidentes aumenta seis veces si se la compara con la situación de velocidad uniforme. Por lo tanto el nivel de consistencia de una vía influye en el comportamiento de los conductores que la recorren y en la frecuencia de accidente en el camino. Esta idea fue postulada por Glennon y Horwod (1980) los cuales, determinaron que un diseño consistente tiene directa relación con la expectativa del conductor. Por lo tanto un diseño es considerado consistente si su geometría se encuentra acorde a las expectativas del conductor, de esta manera estos evitan maniobras críticas que pueden resultar en accidentes (Irizarry y Krames, 1998).

2.2 Criterios de Consistencia

Existen 3 enfoques para evaluar la consistencia; enfoque por velocidad, carga mental y homogeneidad geométrica. El enfoque de velocidad se comienza a desarrollar en la década del 90, siendo sus principales investigadores Lamm y Polus. Lamm propone criterios de análisis de consistencia que se aplican a 2 tipos de elementos geométricos: curvas aisladas simples y curvas compuestas. Este enfoque considera 3 criterios, los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Criterios de Lamm

Criterio	Descripción	Condición	Estado
I	$ V_D - V_{85} $	$< 10 \text{ Km/hr}$	Bueno
		$10 \text{ Km/hr} \leq \Delta V < 20 \text{ Km/hr}$	Regular
		$> 20 \text{ Km/hr}$	Malo
II	$ V_{85}^2 - V_{85}^1 $	$< 10 \text{ Km/hr}$	Bueno
		$10 \text{ Km/hr} \leq \Delta V < 20 \text{ Km/hr}$	Regular
		$> 20 \text{ Km/hr}$	Malo
III	$f_D - f_d$	< 0	malo

Lamm (1988) propone estos criterios de análisis en base a estudios realizados en Estados Unidos y Alemania, donde relacionó los ángulos de curvaturas de curvas sucesivas con la tasa de accidentes. Mediante esta investigación pudo concluir que a mayor ángulo de curvatura, menor es la tasa de accidentes, es decir; a mayor radio, menor tasa de accidentes. Como la velocidad de operación se ve condicionada por el radio, es posible relacionar la velocidad con consistencia. Por lo tanto, que un diseño sea inconsistente significa que es poco seguro para los conductores, de ahí la importancia de la aplicación de estos criterios.

Polus en cambio, analiza trazados completos mediante indicadores de consistencia, en donde mide las velocidades de operación en cada punto a lo largo del trazado. Estos valores permiten estimar una velocidad media del trazado, la cual compara punto a punto con las velocidades de operación. Polus indica que entre mayor sea la diferencia entre ambas velocidades, mayor es la inconsistencia del trazado.

El enfoque de carga mental relaciona la consistencia en el diseño con el esfuerzo mental al que se enfrenta un conductor al transitar por una vía. Este enfoque es más difícil de medir ya que la carga mental de un conductor puede verse afectada tanto por factores externos como el ambiente de conducción así como por factores propios del individuo como la visión, el ritmo cardíaco, la

presión arterial, el tiempo de respuesta, etc. Messer en 1980, postula que vías más inconsistentes presumen una mayor carga mental y mayor posibilidad de maniobras erróneas lo que se traduce en accidentes.

Por otra parte, el enfoque de homogeneidad geométrica relaciona la consistencia con la geometría del diseño. Si un camino es homogéneo geoméricamente, se considera que es consistente.

En este estudio se utilizarán los criterios I y II de Lamm, en el análisis de consistencia dado que son los más utilizados.

2.3 Curvas Sucesivas

Las curvas sucesivas, también conocidas como curvas en “S”, son una configuración geométrica caracterizada por un radio de entrada (R_1) y uno de salida (R_2) unidos por una longitud tangente (TL) y con ángulos de deflexión en contra. Dependiendo de la longitud tangente se pueden dividir en curvas simples y curvas compuestas. Las curvas sucesivas son consideradas compuestas si la longitud tangente es menor que la tangente máxima ($TL < TL_{m\acute{a}x}$). Esto sucede cuando la longitud es tan pequeña que el conductor no alcanza la velocidad deseada en la tangente por tanto la velocidad en la segunda curva queda condicionada por la velocidad en la primera. Las curvas simples son aquellas que tienen una longitud lo suficientemente extensa para que el conductor alcance la velocidad deseada en la tangente, por lo que la velocidad de la segunda curva es independiente de la velocidad alcanzada en la primera curva. La tangente mínima ($TL_{m\acute{i}n}$) es aquella longitud de recta que permite al conductor pasar de la velocidad de operación de la primera curva a una velocidad de operación de la segunda curva. La tangente máxima ($TL_{m\acute{a}x}$) es la longitud de recta necesaria para pasar de una velocidad de operación asociada a la primera curva a la velocidad deseada dentro de la tangente, y luego pasar a la velocidad de la segunda curva.

La Figura 2 muestra los perfiles de velocidad asociados a ambas tangentes; Longitud Tangente mínima y Longitud Tangente Máxima.

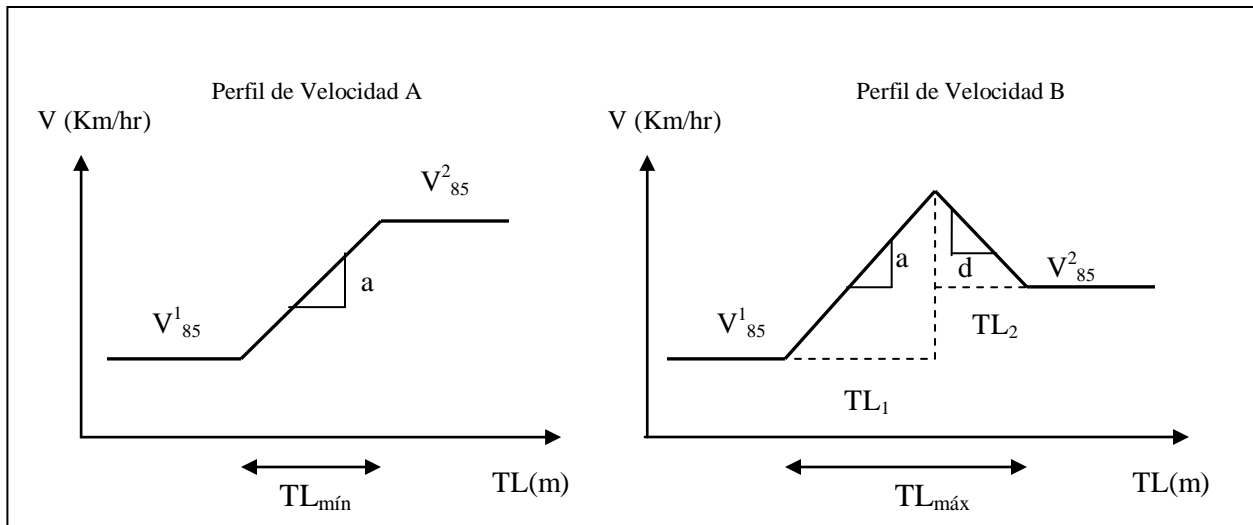


Figura 2: Perfiles de velocidad de $TL_{m\acute{a}x}$ y $TL_{m\acute{i}n}$.

En el perfil de velocidad A se puede observar que al pasar por la curva de entrada, se tiene una velocidad de operación V^1_{85} y al salir de ésta el conductor tiende a acelerar para lograr la Velocidad deseada $V_{m\acute{a}x}$, sin embargo la tangente intermedia es tan pequeña que no lo permite, por lo que se ingresa a la curva de salida con una Velocidad V^2_{85} .

El perfil de velocidad B muestra como de una velocidad V^1_{85} , asociada a la curva de entrada, se acelera hasta alcanzar la velocidad deseada y luego al ver que se aproxima la curva de salida se tiende a desacelerar hasta una V^2_{85} , asociada a la curva de salida. Esto sucede gracias a que la longitud intermedia es lo suficientemente larga para permitir al conductor alcanzar la velocidad deseada en la tangente intermedia.

Lamm (2007) clasifica a las curvas sucesivas de la siguiente manera:

- Caso 1: $TL \leq TL_{m\acute{i}n}$: Curvas dependientes.
- Caso 2: $TL \geq TL_{m\acute{a}x}$: Curvas independientes. La secuencia entre la tangente y la curva es relevante para evaluar la consistencia.
- Caso 3: $TL_{m\acute{a}x} \leq TL \leq TL_{m\acute{i}n}$: Ambas curvas son compuestas.

2.4 Consistencia en las Normativas de Diseño

A nivel internacional son pocas las normativas que incorporan los criterios de consistencia en sus recomendaciones de diseño geométrico. Por ejemplo la norma de diseño geométrico de Canadá (2009), Alemania (1991), Sudáfrica (2003), Nueva Zelanda (2005) y Australia (2009) toman en consideración el criterio I de Lamm, incluyendo estimaciones de la V_{85} a través de modelos de

velocidad que permiten compararla con la velocidad de diseño para curvas aisladas. Sin embargo el criterio II de Lamm es considerado sólo en las normas de Alemania, Canadá y Sudáfrica, las cuales presentan recomendaciones para la evaluación de la consistencia en curvas compuestas.

El Manual de Carreteras en Chile (MCV3) no incorpora explícitamente los criterios de consistencia en el diseño de curvas sucesivas, sólo recomienda para el diseño de curvas compuestas, una relación entre radios de entrada y radios de salida en base a gráficos que provienen de la normativa española. Éste último solo en el caso en que la tangente intermedia sea menor a 400 m.

2.5 Modelos de Velocidad de Operación en Curvas Sucesivas

La Figura 3 representa el perfil de velocidad de operación generado para el conjunto Tangente de entrada (T_E)-Curva 1 (C_1)- Tangente intermedia (T_L)- Curva 2 (C_2) - Tangente de salida (T_S).

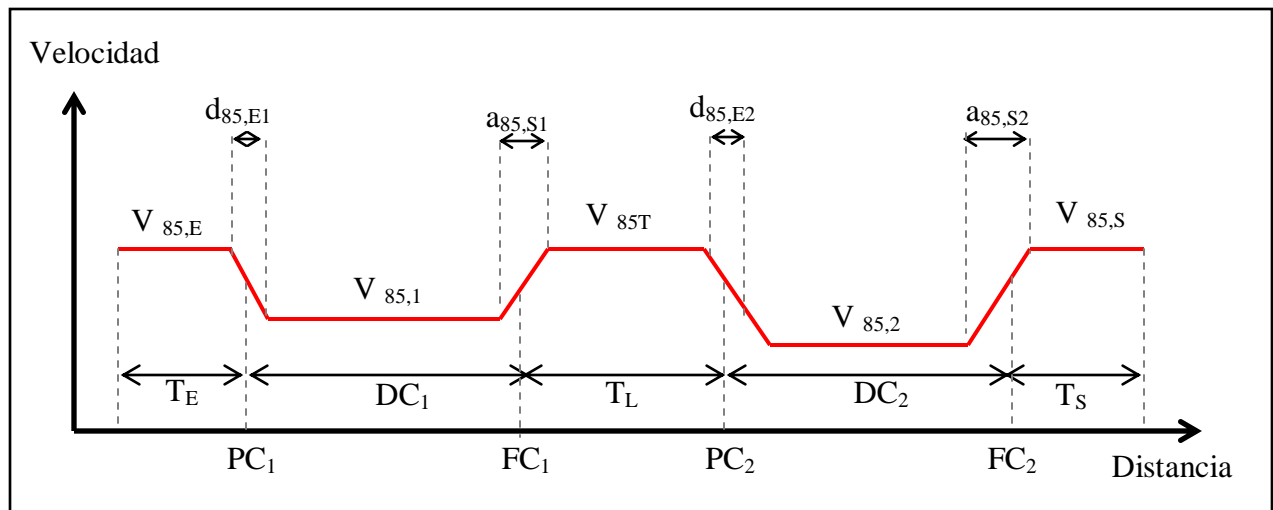


Figura 3: Perfil de velocidad de operación en curvas sucesivas (Díaz, 2012).

El perfil muestra que al ingresar a la primera curva, el conductor tiende a decelerar, hasta alcanzar una velocidad de operación asociada a la C_1 , luego al enfrentarse a la tangente intermedia, incrementa su velocidad, manteniendo una velocidad constante $V_{85,T}$, finalmente disminuye su velocidad para ingresar a la segunda curva, de la cual sale acelerando para alcanzar una velocidad $V_{85,s}$ correspondiente a la velocidad de operación en la tangente de salida. Por lo tanto, antes de ingresar a una curva, los conductores tienden a disminuir su velocidad, caso contrario es con las tangentes, en donde tienden a acelerar para alcanzar una mayor velocidad.

La velocidad de diseño y la velocidad de operación permiten estimar el nivel de consistencia de las carreteras. Ésta última es descrita por Echaveguren (2010) como la variable que describe el

comportamiento del conjunto conductor-vehículo ante condiciones geométricas bajo las cuales circula por una carretera.

Para poder analizar la consistencia mediante la velocidad de operación, es necesario contar con modelos que permitan su calibración, en función de los elementos geométricos del trazado.

En el caso de las curvas sucesivas compuestas, hoy en día existen modelos que permiten describir el comportamiento de los conductores en sectores puntuales del trazado, como es el caso de los modelos de Al Masaeid (1995) que estudia la velocidad en la curva de salida y el diferencial de velocidades entre curvas; el modelo de Fitzpatrick et al (2000) que describe la velocidad en la tangente intermedia; el modelo de Andueza (2000) , el cual describe la velocidad en la curva de salida al igual que los modelos de Polus et al (2000), y el modelo de Memon et al (2008) que permite calcular la velocidad en la tangente intermedia. En base a estos modelos, Díaz (2012), crea un modelo aplicable a las condiciones nacionales.

2.6 Modelo de Velocidad de Díaz

Durante el año 2012 se realizó en Chile un estudio para calibrar modelos de velocidad de operación basados en las condiciones nacionales. En este estudio se proponen modelos que describen la velocidad de operación en curvas sucesivas, con mediciones continuas mediante la técnica de seguimiento vehicular con GPS dinámico de alta precisión. Estos modelos describen el perfil de velocidad para el sistema Tangente- Curva- Tangente- Curva- Tangente y al estar calibrados en Chile, serán los utilizados en este trabajo. Estos modelos, serán los utilizados para verificar la consistencia en esta investigación.

La Tabla 2 muestra los modelos de velocidad de operación de Díaz.

Tabla 2: Modelos de velocidad de operación de Díaz

Elemento	Modelo	R²
Curva de Entrada	$V^{1}_{85} = 29,6 + 0,723V_{85}^{TE} - 2,071\left(\frac{1}{R_1}\right)$	0,714
Tangente Intermedia	$V^T_{85} = 105,7 + 0,013T_L - 3,337,1\left(\frac{1}{R_1}\right)$	0,690
	$V^T_{85\max} = 106,1 + 0,0146T_L - 2,884,3\left(\frac{1}{R_1}\right) - 571,1\left(\frac{1}{R_2}\right)$	0,708
	$\Delta V_{85} = 761,3\left(\frac{1}{R_1}\right) - 1,255,2\left(\frac{1}{R_2}\right)$	(*)
Curva de Salida	$V^2_{85} = 88,5 - 0,0195T_L - 2,11\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$	0,350
	$V^2_{85} = 113 - 4,963,6\left(\frac{1}{GM_s}\right)$	0,811
	$V^2_{85} = 104,2 - 2,084,8\left(\frac{1}{GM_L}\right)$	0,951

Nota: V^1_{85} : velocidad de percentil 85 en la curva de entrada, en Km/hr; V^T_{85} : velocidad de percentil 85 en la tangente intermedia, en Km/hr; $V^T_{85\max}$: velocidad de percentil 85 máxima en la tangente intermedia, en Km/hr; ΔV_{85} : diferencia entre las velocidades de percentil 85 entre las curvas de entrada y salida; V^2_{85} : velocidad de percentil 85 en la curva de salida, en Km/hr. (*) puesto que en este modelo se forzó la eliminación del término constante en la regresión, el coeficiente de correlación ajustado no se calcula.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CONSISTENCIA

A continuación se describe la metodología empleada para analizar la consistencia en el diseño geométrico.

3.2 Modelo General de Diseño

La configuración geométrica utilizada en este estudio, consta de curvas sucesivas compuestas por una tangente de entrada, una curva de radio R_1 , una tangente intermedia T_L , una curva de radio R_2 y tangente de salida. La Figura 4 muestra esta configuración.

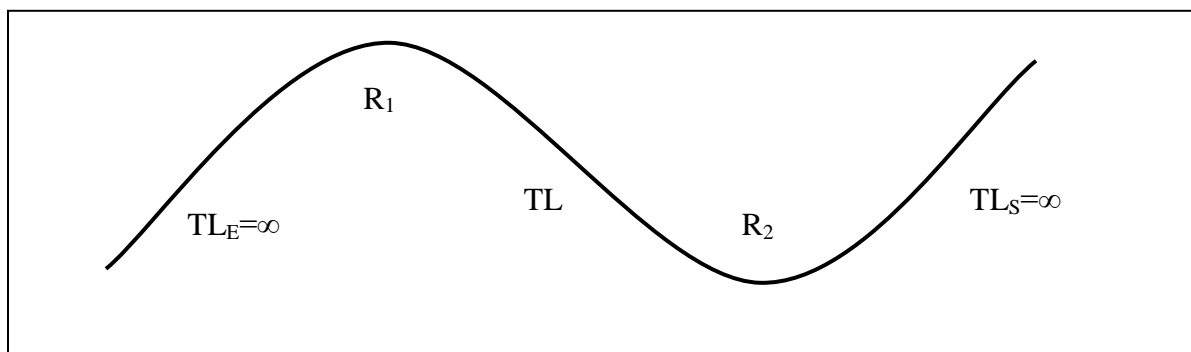


Figura 4: Configuración de curva sucesiva utilizada.

Tanto la tangente de entrada como de salida tienen longitudes infinitas. Los demás elementos geométricos tienen rangos de variación que dan origen a distintos escenarios, los que serán descritos más adelante.

3.3 Variables de Estudio

A continuación se presenta una descripción de cada una de las variables a considerar en la definición de escenarios, con sus respectivos rangos.

3.2.1 Velocidad Deseada

Velocidad deseada (V_d): Corresponde a una velocidad en la cual el conductor se siente cómodo y seguro, bajo una condición en que la densidad de tránsito tiende a cero y sin restricciones en el trazado. También se establece como la velocidad de flujo libre, según el Highway Capacity Manual (HCM, 2002). Para fines de este estudio se considerarán como velocidades deseadas a la V_d más 20 Km/hr, tal como muestra la Ecuación 1, según recomendaciones del MCV3, para sectores de recta prolongadas. Se utilizarán velocidades de diseño correspondientes a caminos locales y colectores, ya que diversas investigaciones concluyen que en este tipo de caminos, con

velocidades de diseño inferiores a 90 Km/hr, se producen las mayores inconsistencias. Estos valores se muestran en la Tabla 3.

$$V_d = V_D + 20 \text{ Km/hr}$$

Ecuación 1

3.2.2 Radio

Radio de Entrada y Salida (R_1 , R_2): Los valores de radio utilizados en el estudio se obtienen del MCV3 y tanto el radio de entrada como el de salida varían en el mismo rango. Esto permite realizar el análisis en ambos sentidos de la curva sucesiva. Los valores que tomarán los radios dependen de la velocidad deseada que se esté analizando. La Tabla 3 muestra los rangos de radios correspondientes a cada velocidad deseada.

Tabla 3: Rangos de radios y velocidad deseada.

Velocidad de Diseño (Km/hr)	Velocidad Deseada (Km/hr)	Rango de Radios (m)
60	80	150 - 350
70	90	200 - 500
80	100	300 - 700

3.2.3 Velocidad Específica

Velocidad Específica (V_e): La velocidad específica se refiere a la velocidad máxima en la curva horizontal, según criterios de comodidad y seguridad correspondiente a la velocidad de diseño de la curva horizontal. Se obtiene del MCV3 y su valor es dependiente del radio de análisis. Estos valores pueden ser revisados en el Anexo A.

3.2.4 Aceleración y Deceleración

Aceleración y Deceleración (a , d): Se refiere a la aceleración al momento de salir de una curva y la desaceleración al momento de ingresar a la otra. Ambas variables se extraen del trabajo de Basualto (2003), quien estableció valores característicos tanto de aceleración y de deceleración según el radio de curvatura para carreteras nacionales.

La Figura 5 muestra el rango de valores para la aceleración y la deceleración en curvas compuestas considerada para cada escenario de evaluación.

$$a(m/s^2) = \begin{cases} 0.21 & R < 250 \\ 52.524 * \frac{1}{R} & 250 < R < 436 \\ 0.06 & R > 436 \end{cases} d(m/s^2) = \begin{cases} -0.55 & R < 250 \\ -131.418 * \frac{1}{R} & 250 < R < 436 \\ -0.24 & R > 436 \end{cases}$$

Figura 5: Rango de valores para aceleración y deceleración. (Basualto, 2003)

3.2.5 Longitud de Tangente

Longitud de Tangente (TL): Ésta es una variable de longitud medida en metros, la cual está presente al comienzo, en medio y al final de la configuración propuesta. Las tangentes de entrada y salida se consideran infinitas, mientras que la tangente intermedia variará su longitud dependiendo si se trata de una Longitud Tangente Máxima, Longitud Tangente Mínima ó Longitud Tangente Crítica.

Para calcular las Longitudes de Tangente Máxima, Tangente Mínima y Tangente Crítica se utilizan las ecuaciones 2, 3 y 4, respectivamente.

$$TL_{min} = \left| \frac{(V_{85}^2)^2 - (V_{85}^1)^2}{25,92a} \right| \tag{Ecuación 2}$$

$$TL_{max} = \left| \frac{(V_d)^2 - (V_{85}^1)^2}{25,92a} \right| + \left| \frac{(V_{85}^2)^2 - (V_d)^2}{25,92d} \right| \tag{Ecuación 3}$$

$$TL_{crit} = \left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } V_{85}^2 > V_d & \rightarrow TL_{crit} = TL_{min} \\ \text{Si } V_{85}^2 < V_d & \rightarrow TL_{crit} = TL_{max} \end{array} \right\} \tag{Ecuación 4}$$

3.3 Metodología Aplicada

El desarrollo de este estudio se llevó a cabo mediante un proceso iterativo, utilizando el mismo método de aplicación para las 3 velocidades deseadas. La Figura 6 muestra el esquema de aplicación.

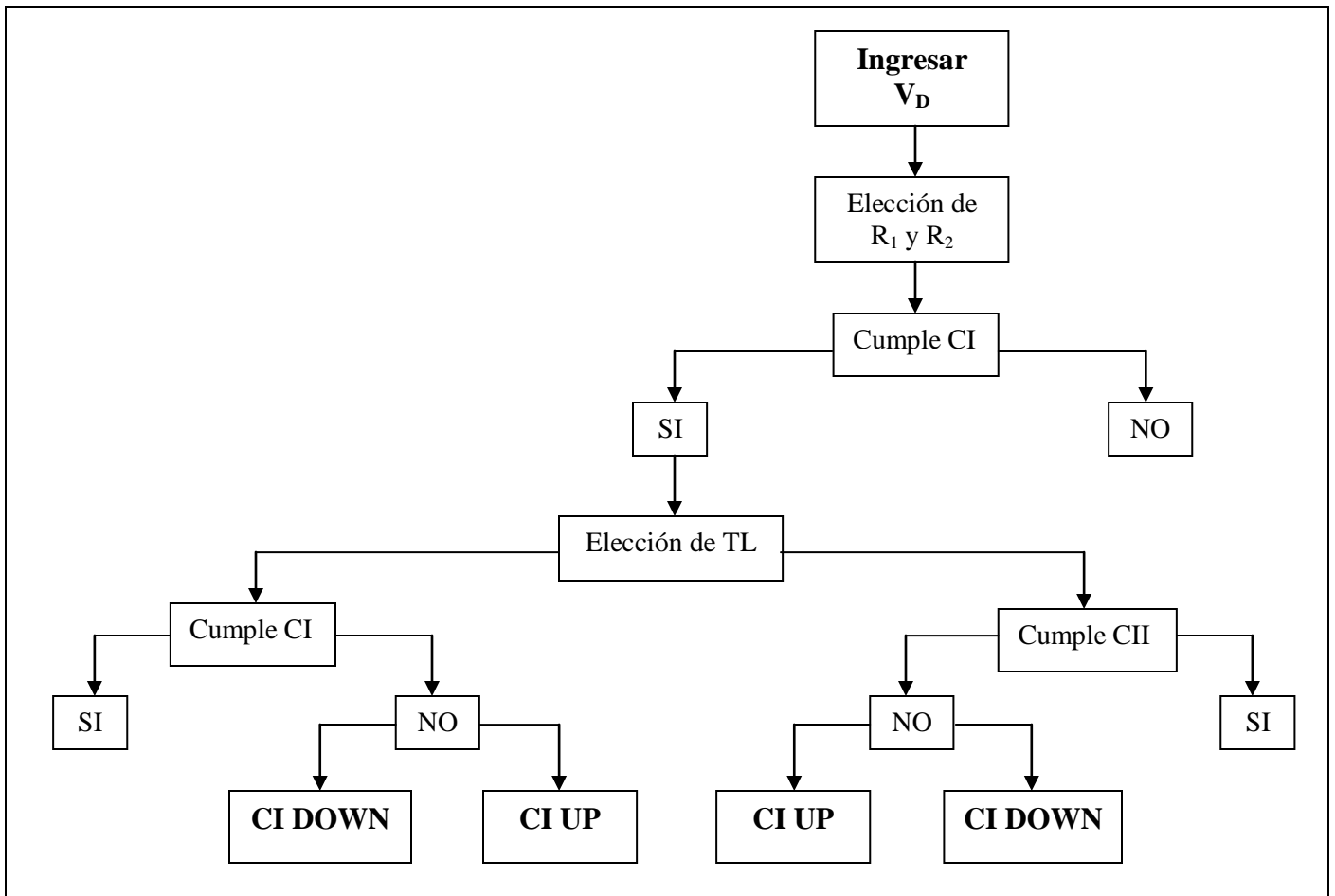


Figura 6: Diagrama de iteraciones

Como se puede observar en la figura 6, la primera variable a ingresar es la velocidad deseada. Dependiendo de ésta, se ingresa el radio de entrada (R_1) al cual se le asigna una V_e , que se extrae del MCV3 y una velocidad de operación, calculada mediante el modelo de Díaz. Con estas dos velocidades se puede aplicar el Criterio I de Lamm, iterando el valor de los Radios hasta encontrar un rango que cumpla con dicho criterio. De esta manera se logra obtener el rango de radios expuesto en la Tabla 3.

Luego de verificar el Criterio I de Lamm en la curva de entrada (R_1), se ingresa el radio de salida (R_2), el cual variará dentro del mismo rango que el radio de entrada, así el análisis se puede realizar en ambos sentidos de la configuración geométrica propuesta.

Luego de obtenidos ambos radios, se ingresa la longitud de tangente intermedia, cuyo valor se iterará hasta llegar a las longitudes límites; superior e inferior, que no den cumplimiento al criterio I y II de Lamm.

Para saber qué criterios se deben aplicar en cada caso, hay que determinar las longitudes de tangente crítica, mínima y máxima, las que se calculan mediante las ecuaciones 2, 3 y 4. Estas longitudes necesitan de los valores de aceleración y deceleración que pueden determinarse a través de lo expuesto en la Figura 5.

Una vez calculadas las longitudes de tangente crítica, máxima y mínima se itera el valor de la longitud intermedia para conocer el rango de valores en que se cumple el criterio I, en la segunda curva, y el criterio II, en la configuración completa. De esta manera se obtienen las variables CI UP, CII UP, CI DOWN Y CII DOWN que corresponden a los valores límites de tangente intermedia dentro de los cuales se cumplen los criterios de consistencia.

3.4 Resultados Obtenidos

Al iterar el valor de la Longitud Tangente Intermedia, tal como muestra la Figura 6, se crean rangos de diseño factible según el cumplimiento de los criterios I y II de Lamm, estos rangos se obtienen a partir de las siguientes variables;

CI UP: Para un cierto R_1 y R_2 , esta variable muestra los valores de LT desde donde se empieza a cumplir el Criterio I de Lamm. Indicando que valores bajo de este rango no son recomendables para el diseño.

CI DOWN: Para un cierto R_1 y R_2 , esta variable indica el valor de LT hasta donde se cumple el Criterio I de Lamm.

CII UP: Para un cierto R_1 y R_2 , esta variable es utilizada para indicar el valor de LT desde donde se empieza a cumplir el Criterio II de Lamm.

CII DOWN: Para un cierto R_1 y R_2 , esta variable sirve para mostrar el límite superior de LT, hasta donde se cumple el Criterio II de Lamm.

Es importante destacar que dependiendo de la configuración de la curva sucesiva, ésta puede ser analizada como simple o compuesta, dependiendo de la longitud crítica. A las curvas compuestas se le aplican los Criterios I y II de Lamm, por lo que el rango de diseño factible para este tipo de curvas está dado por; CI UP; CI DOWN; CII UP y CII DOWN. A diferencia de las curvas compuestas, las curvas simples se someten sólo al Criterio I de Lamm, por lo que su rango de diseño factible queda limitado por CI UP y CI DOWN.

La Figura 7 muestra una representación de la forma en que se presentan los resultados de este estudio.

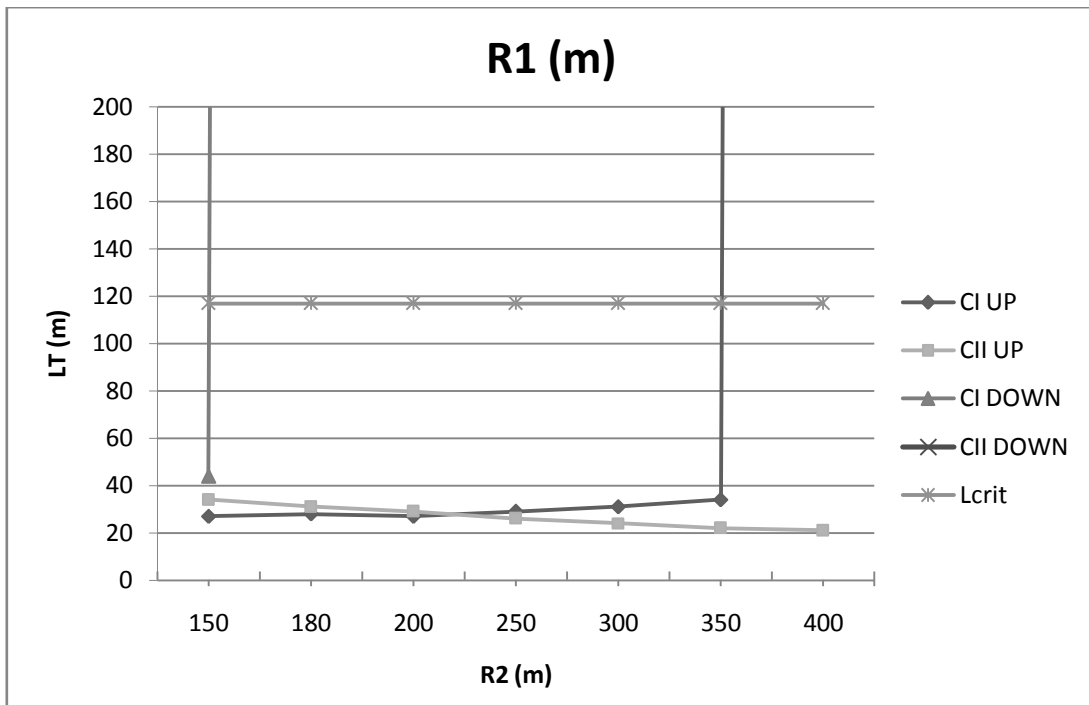


Figura 7: Gráfico tipo de resultados.

R1 representa el radio de entrada, R2 los distintos radios de salida, LT a la longitud de tangente intermedia y Lcrit a la longitud crítica.

La zona a la izquierda de la línea verde, indica la zona de diseño donde R1 no cumple el Criterio I de Lamm, la zona a la derecha de la línea azul, indica la zona donde R2 no cumple con el Criterio I de Lamm y la zona entre estas dos líneas indica la zona de diseño consistente.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para una velocidad deseada de 80 Km/hr, a modo de ejemplo y al ábaco generado para las dos configuraciones propuestas: igual R1 con distintos R2 e igual R2 con distintos R1. Los demás resultados se pueden observar en el Anexo B.

4.1 Análisis para un R1 Fijo y un R2 Variable

La Tabla 4 muestra un extracto de la planilla utilizada para determinar los límites de tangente para la cual se cumplen los criterios de consistencia en el caso de $V_D=80\text{Km/hr}$. Ésta muestra los resultados para un radio de entrada igual a 200 m y 7 radios de salida. La Figura 8 presenta una gráfica de los resultados obtenidos.

Tabla 4: Resultados para R1 fijo y R2 variable

R ₁ (m)	V ₈₅ ¹ (Km/hr)	R ₂ (m)	V ₈₅ ² (Km/hr)	TL _{crit} (m)	CIUP (m)	CIDOWN (m)	CII UP (m)	CIDOWN (m)
200	77.1	150	80	85	25	42	33	∞
200	77.1	180	80	85	26	∞	30	∞
200	77.1	200	80	85	26	∞	29	∞
200	77.1	250	80	85	28	∞	26	∞
200	77.1	300	80	85	29	∞	23	∞
200	77.1	350	80	85	33	∞	22	∞
200	77.1	400	80	85	∞	∞	20	∞

La Tabla 4 muestra que para un R₁ de 200 (m), TL_{crit} es de 85 (m). Sobre esta longitud las curvas se comportan como simples y bajo este valor como compuestas. Para esta configuración las longitudes límites que cumplen con el criterio I y II de Lamm son de 25 (m) y 33 (m), respectivamente, para un radio de entrada de 150 (m) y el límite superior es de 42 (m) en el caso del criterio I. El cumplimiento del criterio II de Lamm no tiene límite superior. Para las demás configuraciones no hay límites superiores que restrinjan el cumplimiento del criterio I y II de Lamm, independiente de la combinación de radios. Estos valores fueron pasados a una gráfica la cual se puede visualizar en la Figura 8.

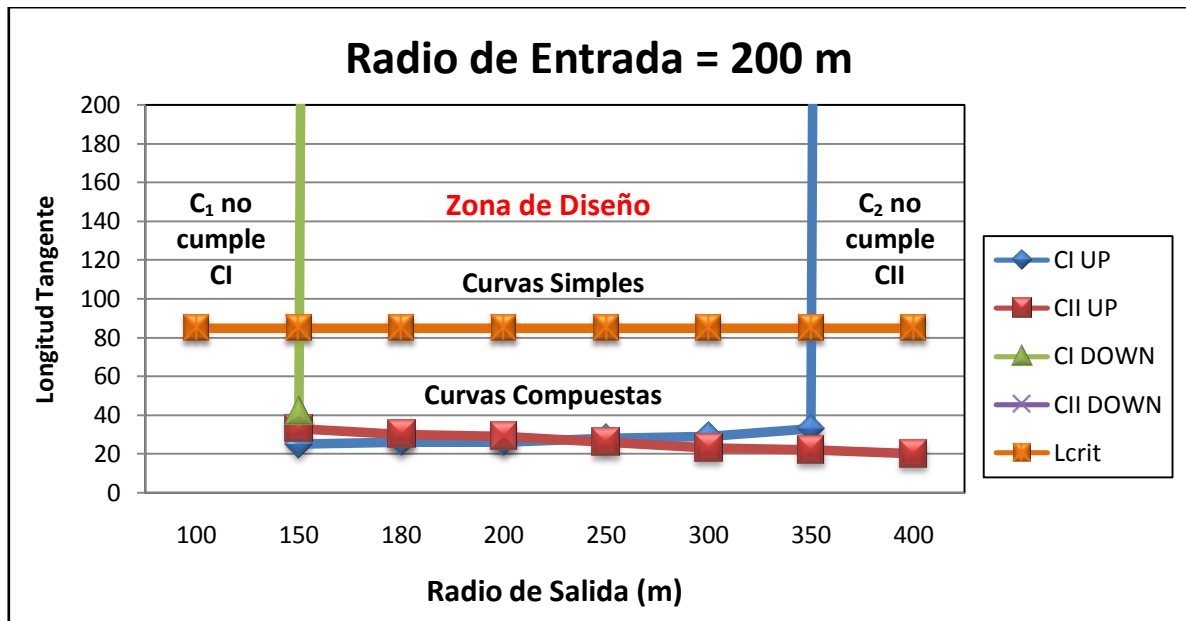


Figura 8: Gráfico de resultados para $V_D=80$ Km/hr y $R_1=200$ m

En la gráfica de la figura 8 es posible visualizar 3 zonas que combinan radios de entrada, radios de salida y tangente intermedia; la zona de la izquierda de la recta verde indica una zona inconsistente dado que la curva 1 no cumple con el Criterio I de Lamm. La zona entre la recta verde y la azul representa una zona factible de diseño en donde se cumplen ambos criterios de consistencia. La zona a la derecha de la recta azul corresponde a una segunda zona de inconsistencia donde no se cumple con el Criterio II de Lamm. Sin embargo para longitudes intermedias sobre los 85 (m) no se considera el criterio II de Lamm, ya que con esta configuración, las curvas sucesivas se comportan como curvas simples. De lo anterior si se desea realizar un diseño consistente de curvas sucesivas con un radio de entrada de 150 (m) es necesario que la tangente intermedia sea de a lo menos 40 (m) y el radio de salida puede variar entre los 150 (m) y 350 (m).

4.2 Análisis para un R2 Fijo y un R1 Variable

En el acápite anterior se analizó la configuración de una curva en S, asumiendo un radio de entrada fijo, e incrementando el radio de salida. En este punto se analiza la consistencia en el sentido inverso, asumiendo que la configuración es reversible, es decir se trata de una carretera bidireccional.

La Tabla 5 muestra un resumen de las configuraciones analizadas para una velocidad específica de 80 Km/hr y un radio de salida de 200 m.

Tabla 5: Resultados para un R1 variable y R2 fijo

R ₁ (m)	V ¹ ₈₅ (Km/hr)	R ₂ (m)	V ² ₈₅ (Km/hr)	TL _{crit} (m)	CIUP (m)	CIDOWN (m)	CII UP (m)	CIDOWN (m)
150	73.6	200	80	180	30	∞	30	∞
180	75.9	200	80	117	27	∞	29	∞
200	77.1	200	80	85	26	∞	29	∞
250	79.2	200	63.6	37	23	∞	27	∞
300	80	200	77.6	32	21	∞	25	∞
350	80	200	77.9	30	20	∞	24	∞

Se observa en la Tabla 5, que para un radio de entrada de 150 (m) los valores de longitud de tangente crítica, así como los límites para el cumplimiento de los Criterios I y II son los más altos de la tabla; en cambio para un radio de entrada de 350 (m) las longitudes de tangente disminuyen considerablemente. Esto se debe a que en radios de entrada más amplios como el caso de 300 (m) y 350 (m), se alcanza la velocidad deseada en la curva, por lo que la tangente intermedia sólo es necesaria para desacelerar antes de entrar a la segunda curva, llegando a 36 (m) y 34 (m), respectivamente.

4.3 Síntesis de Resultados

En el caso de radios de entrada fijo y distintos radios de salida, a medida que el radio de entrada es más grande, las longitudes de tangente intermedia tienden a ser más pequeñas, debido a que radios más grandes conllevan velocidades de operación más altas y eso se traduce en una menor diferencia con la velocidad específica en la recta intermedia. Esto se puede observar en la Figura 2, la cual muestra el perfil de velocidad que se genera en este tipo de configuración. La longitud crítica se comporta de igual manera, ya que a medida que el radio de entrada es más grande, las curvas sucesivas tienden a comportarse como curvas simples para longitudes de tangente más pequeñas. Por lo tanto el radio de entrada y la longitud de tangente intermedia son inversamente proporcionales en un diseño consistente.

En el caso inverso, al tener radio de salida fijo y distintos radios de entrada, a medida que el radio de entrada es más grande, las longitudes de tangente intermedia tienden a ser más pequeñas, la longitud crítica adopta el mismo comportamiento, ya que el radio y la velocidad de operación son directamente proporcionales. Por lo tanto al igual que el caso anterior, el radio de entrada y la longitud de tangente intermedia son inversamente proporcionales.

CAPÍTULO V: ANALISIS COMPARATIVO CON NORMATIVA NACIONAL

En este capítulo se realiza una comparación entre las recomendaciones de diseño que entrega el MCV3 para el diseño de curvas sucesivas inversas, con los resultados obtenidos en este estudio. Se considera la comparación con las longitudes de tangente mínimas, máximas, radios mínimos y la relación entre radios de entrada y radios de salida.

5.1 Longitud de Tangente Mínima

El MCV3 indica que la longitud de tangente mínima entre curvas sucesivas debe ser 1.4 veces la velocidad de diseño. Lo anterior, para permitir que el conductor se mantenga al menos 5.0 segundos en recta. Sin embargo los resultados obtenidos en este estudio indican que para asegurar un diseño consistente, las longitudes de tangente podrían ser menores a las propuestas por el MCV3. En la Tabla 6 se muestra una comparación entre los valores de longitud mínima recomendada por el MCV3 y las obtenidas en el estudio, para las distintas velocidades analizadas.

Tabla 6: Comparación entre longitudes de tangente mínimas

V_D (Km/hr)	TL_{\min} MCV3 (m)	TL_{\min} Obtenido (m)
60	84	17
70	98	18
80	112	21

Esta tabla indica que las longitudes mínimas propuestas por el MCV3 son conservadoras desde el punto de vista del diseño, y que su cumplimiento asegure un diseño consistente.

5.2 Longitud de Tangente Máxima

La longitud de tangente máxima recomendada por la normativa nacional es de 20 veces la velocidad de diseño, lo cual corresponde a un tiempo de conducción máximo en recta de 72 segundos. Los resultados de este estudio indican que a excepción de radios de entrada y salida iguales, las tangentes que dan cumplimiento a los criterios I y II de Lamm no tienen límite superior. La Tabla 7 muestra las longitudes máximas recomendadas por el MCV3 y las obtenidas en el estudio.

Tabla 7: Comparación entre longitudes de tangente máximas

V_D (Km/hr)	$TL_{m\acute{a}x}$ MCV3 (m)	$TL_{m\acute{a}x}$ Obtenido (m)
60	1200	∞
70	1400	∞
80	1600	∞

Dado que el MCV3 acota la longitud máxima en recta debido a razones de fatiga, adormecimiento, encandilamiento, etc., se sugiere que estos límites deberían respetarse, aun cuando la consistencia permitiría longitudes superiores.

5.3 Radio Mínimo

La normativa nacional recomienda utilizar radios mínimos que dependen de la velocidad de diseño, del peralte y de la fricción lateral. La Tabla 8 muestra el radio mínimo recomendado por el MCV3 en función de la velocidad de diseño, el peralte y la fricción, los cuales se comparan con los obtenidos en este trabajo bajo un criterio de consistencia, en particular bajo el cumplimiento del criterio I de Lamm.

Tabla 8: Radios mínimos propuestos por el MCV3

V_D (Km/hr)	p (%)	f	$R_{m\acute{i}n}$ (m)	$R_{m\acute{i}n}$ Obtenido (m)
60	7	0,165	120	150
70	7	0,149	180	200
80	7	0,132	250	300

Los resultados indican que los radios mínimos recomendados por el MCV3 no aseguran consistencia en el diseño, debido a que no cumplen con el criterio I de Lamm.

5.4 Relación entre Radios Consecutivos.

El MCV3 recomienda utilizar un ábaco para diseñar los radios consecutivos de una curva sucesiva inversa, sólo si la tangente intermedia es inferior a 400 (m). La Figura 9 muestra el ábaco del MCV3 destacando 4 puntos. Estos puntos representan distintas configuraciones de curvas sucesivas, las que se compararán con los resultados de esta memoria de título para finalmente entregar una propuesta de diseño.

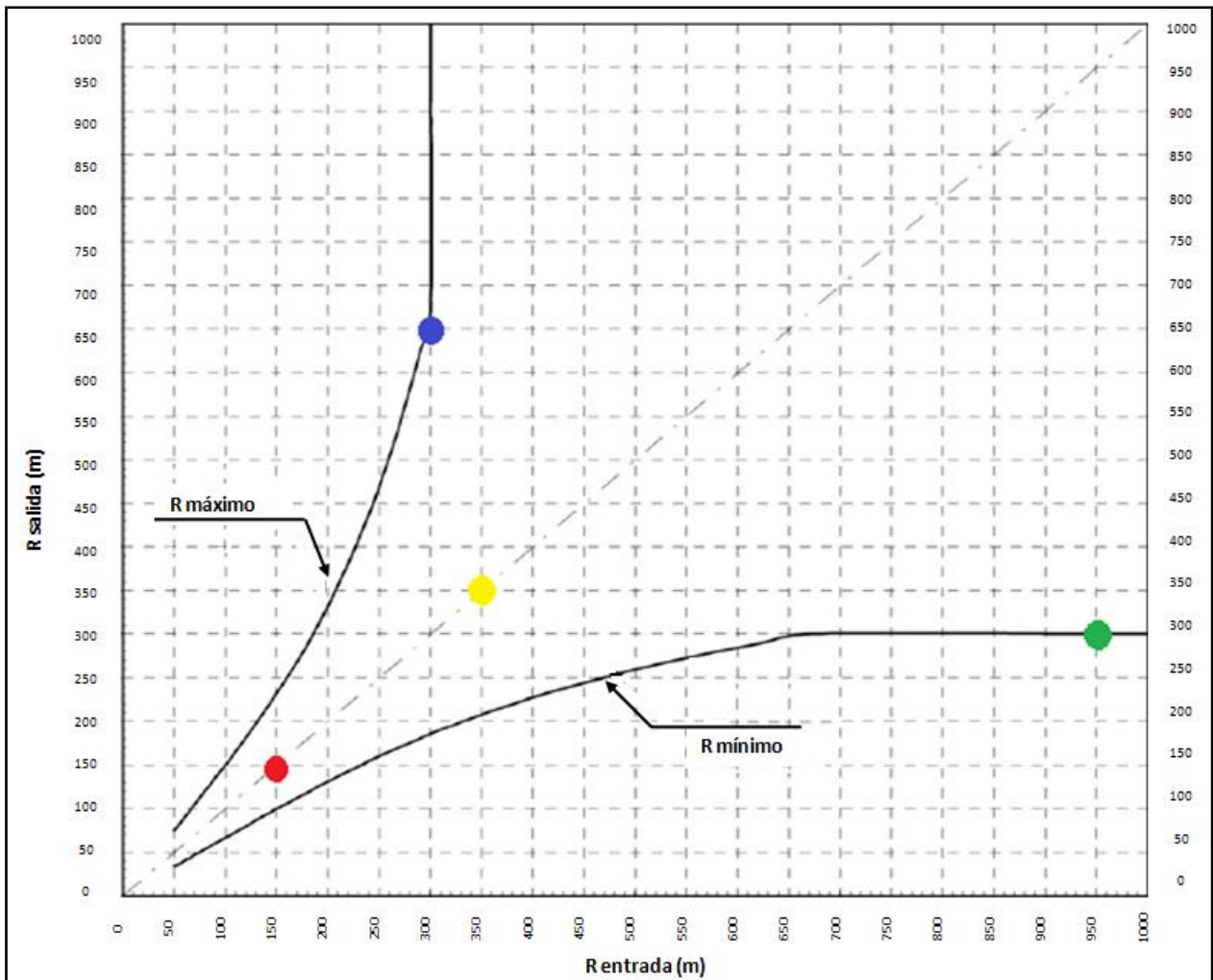


Figura 9: Ábaco de relación entre radios consecutivos

Caso 1: Corresponde al punto rojo. Este punto indica que para un radio de entrada de 150 (m) debe haber un radio de salida de 150 (m). Al compararlo con los resultados de este trabajo, se puede concluir que si se diseña una curva sucesiva en base a esta configuración, solo se daría cumplimiento al Criterio I de Lamm, para un rango de tangente entre 29 y 48 m, y no para todas las configuraciones menores a 400 m, por lo que el diseño consistente estaría condicionado por la longitud tangente.

Caso 2: La configuración geométrica de este caso está dada por el punto azul. Este diseño tiene un radio de entrada de 300 metros y un radio de salida de 650 metros. Para que este diseño sea consistente su velocidad de diseño debe ser de 80 Km/hr, ya que velocidades inferiores a estas provocarían que el radio de salida no cumpla con el Criterio II de Lamm. Por lo tanto este diseño ve condicionada su consistencia por la velocidad de diseño correspondiente al radio de salida.

Caso 3: Corresponde al punto amarillo. Esta configuración geométrica está conformada por un radio de entrada de 150 (m) y un radio de salida de 150 (m). Al compararlo con los resultados obtenidos en este estudio, el punto analizado corresponde a un diseño consistente, puesto que cumple con ambos criterios.

Caso 4: La configuración de diseño de este caso está dada por el punto verde. Ésta indica que la curva sucesiva a diseñar tiene un radio de entrada de 950 (m) y un radio de salida de 300 (m). Si se compara esta configuración con los resultados obtenidos del estudio, se puede asegurar que el diseño no será consistente, debido a que el radio de entrada es muy grande por lo que no cumpliría con el Criterio I de Lamm, es más el radio de entrada o salida más grande que se puede utilizar para asegurar un diseño consistente es de 600 (m) para una velocidad de diseño de 80 Km/hr. Por lo que un diseño consistente en este caso estaría condicionado por el radio de entrada.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la consistencia en el diseño geométrico de curvas sucesivas inversas para distintas configuraciones de $(R_1-T_L-R_2)$, considerando modelos de velocidad nacionales y contrastando con las recomendaciones del MCV3.

De la revisión de la literatura se concluye que para el caso de las curvas sucesivas inversas, los criterios de consistencia aplicables se asocian principalmente al enfoque de velocidad, en particular a los criterios I y II de Lamm.

De la revisión de normativas de diseño extranjeras se concluye que el análisis de consistencia aún no ha sido incorporado en masivamente en los estándares de diseño. Sólo se encontraron casos puntuales como los de Canadá, Alemania, Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica.

En el caso nacional, el MCV3 no incorpora explícitamente la consistencia. Sólo entrega relaciones entre radios de entrada y radios de salida para curvas sucesivas inversas, cuya longitud de tangente intermedia sea menor a 400 (m). Esto deja un vacío en la normativa, pues no indica de qué forma seleccionar los radios en el caso de tener tangentes más largas.

Respecto a la definición de escenarios de análisis, cabe destacar que sólo fue posible una pre configuración de escenarios en función de los R_1 y R_2 dada una cierta velocidad, debido a que la longitud de tangente intermedia va configurando nuevos escenarios a medida que se va realizando un proceso iterativo respecto de la longitud de tangente.

Para la selección de los escenarios primeramente fue necesario evaluar el cumplimiento del Criterio I de Lamm en la curva de entrada (R_1) de manera que el escenario fuese factible de analizar, como curva inversa, bajo el enfoque de consistencia.

Del análisis de los resultados obtenidos en los distintos escenarios, se puede concluir lo siguiente:

- Para las distintas configuraciones de curvas inversas sucesivas, existe una zona de diseño consistente, que relaciona el radio de entrada (R_1), el radio de salida (R_2) y la longitud de tangente intermedia (TL_{\min}). Estas zonas de diseño consistente fueron graficadas en forma de ábacos de diseño para su posterior utilización.

- Las zonas de diseño consistente se encuentran acotadas principalmente por una relación de radios de entrada y salida y por el cumplimiento de una longitud de tangente mínima. No existe en esta zona una longitud máxima entre curvas que limite la consistencia.
- La zona de diseño consistente queda definida principalmente por el cumplimiento del Criterio I, tanto en la curva de entrada como de salida. El cumplimiento del Criterio II limita solo la longitud mínima de tangente, pero no acota la configuración en una tangente máxima.
- A medida que la velocidad de diseño aumenta, para un mismo radio de entrada, el rango de radios de salida se desplaza hacia valores superiores, básicamente por la condición de cumplimiento del criterio I en la curva de salida.
- Al analizar en sentido inverso se observa que a medida que el radio de entrada aumenta, las longitudes de tangente intermedia disminuyen, esto debido a que el radio y velocidad de operación son directamente proporcionales, por lo tanto a medida que estos aumentan, la longitud de tangente intermedia necesaria para alcanzar la velocidad deseada disminuye.

Al contrastar los resultados obtenidos con la normativa nacional, se concluye lo siguiente:

- Tanto las longitudes mínimas como las máximas recomendadas por el MCV3, son conservadoras desde el punto de vista del diseño, y su cumplimiento estaría asegurando consistencia.
- Los radios mínimos recomendados por la normativa no cumplen con el Criterio I de Lamm y los extremos del ábaco de relación entre radios consecutivos no entregan diseños consistentes.

Como recomendaciones finales de este trabajo se sugiere lo siguiente:

- Se recomienda analizar como cambiarían los resultados si se flexibilizan los criterios de consistencia desde una “buena” consistencia hacia una consistencia “regular”, según los indicadores de Lamm.
- Se recomienda utilizar los ábacos desarrollados en este estudio como una herramienta de verificación de consistencia en el diseño de curvas sucesivas inversas.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Masaied H.R., Hamed M. Aboul-Ela M. y Ghannam A.G. (1995). Consistency of horizontal alignment for different vehicle classes. *Transportation Research Record*, 1500, 178–183.

Andueza P.J. (2000). Mathematical models of vehicular speed on mountain roads. *Transportation Research Record*, 1701, 104–110.

AUSTROADS, “Guide to Road Design Part 3: Geometric Design” (2009), Association of Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities, Australia.

Basualto J. (2003), Análisis de aceleración en la consistencia de elementos simples de alineamientos horizontales, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Díaz (2012), Modelación de velocidades de vehículos livianos en curvas horizontales inversas y sucesivas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Echaveguren T. y Sáez J. (2001). Indicadores de Consistencia en el Diseño Geométrico de Carreteras. Artículo presentado en X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Concepción. Chile.

Echaveguren T. (2010). Modelación de Velocidad de Operación. Estado del Arte. Documento de Trabajo, DT – 01/10. FONDECYT 11090029. Universidad de Concepción, Chile.

FGSV, “Richtlinien für die Anlage von Landstraßen” (1991), Forschungsgesellschaft für Straßen – und Verkehrswesen, Germany.

Fitzpatrick K., Elefteriadou L., Harwood D., Collins J., McFadden J., Anderson I., Krammes R., Irizarry N., Parma K., Bauer K., y Passetti K. (2000). Alternative design consistency rating methods for two – lane rural highways. Publication FHWA – RD – 99 – 172, Washington D.C., Estados Unidos.

Highway Capacity Manual (HCM) (2002). Publication of the Transportation Research Board of the National Academies of Science. United States.

Irizarry N., Krammes R., McLean. (1998). Linear Regression Models For Estimating Operating Speeds Of Passenger Vehicles On Rural Two-Lane Highways. X Congreso Panamericano de Transporte. Santander, España. pp 651 – 658.

- Krammes R., Rao K., and Ho H. (1995), “Highway geometric design consistency software”, *Transportation Research Record*, 1500 , pp. 19 – 24.
- Lamm R., Choueiri E., Hayward J., and Paluri A. (1988) “Possible Designing Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane roads”, United States.
- Lamm R., Beck A., and Zumkeller A. (2000) “Analysis and evaluation of interrelationships between traffic safety and highway geometric design on two-lane rural roads”, *Proceedings of 2nd International Symposium on Highway Geometric Design Practices*, Germany, pp. 557 – 570.
- Lamm R., Beck A., Ruscher T., and Mailaender T. (2007) “How to make two -lane rural roads safer. Scientific background and guide for practical application”, WitPress, 1st Edition, United States.
- McLean J. (1980), “An alternative to the design concept for low speed alignment design”, *Transportation Research Record*, 702, pp. 55 – 63.
- McLean J. (1981) “Driver Speed Behaviour and Rural Road Alignment Design”, *Traffic Engineering Control*, pp. 208 – 211.
- Memon R., Khaskheli G.B. y Qureshi A.S. (2008). Operating speed models for two lane rural roads in Pakistan”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(5), 443 – 453.
- Messer C., “Methodology for evaluating geometric design consistency”, *Transportation Research Record*, 757 (1980), pp. 7 – 14.
- MOP (2008). Manual de Carreteras Volumen 3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- Polus A., Fitzpatrick K. y Fambro D. (2000). Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, 1737, 50–57.
- Riveros D., Altamira L., Vargas S. y Echaveguren T. (2009). Criterios para el análisis de consistencia del diseño geométrico: velocidad, aceleración, visibilidad y confiabilidad. Presentado en el XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Buenos Aires, Argentina.
- SANRAL (2003), “Geometric Design Guidelines”, South African National Road Agency, South Africa.

TAC (2009) “Geometric Design Guides for Canadian Roads”, Transportation Association of Canada, Canada.

Transit NZ, “State Highway Geometric Design Manual, Section 4: Horizontal Alignment” (2005), New Zealand Transport Agency, New Zealand.

ANEXOS