

ANÁLISIS DE LA DISTANCIA DE MANIOBRA EN CURVAS HORIZONTALES AISLADAS DE CAMINOS RURALES BIDIRECCIONALES

Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción techaveg@udec.cl
Diego Larenas, Universidad de Concepción

RESUMEN

El diseño geométrico de curvas horizontales se realiza considerando dimensionando el radio y peralte usando velocidad de diseño y/o específica. Asume como condición de seguridad que el conductor nunca sobrepasa ese valor. Asimismo, asume la curva horizontal como una entidad geométrica aislada, sin prestarle atención a las tangentes de entrada. Esto no garantiza que un diseño geométrico de una curva horizontal otorgue seguridad para los usuarios. Diversos estudios han determinado la importancia de la tangente de entrada de una curva horizontal puesto que permite al conductor identificar la existencia de una curva y adaptar su velocidad de operación. Si el diseño no proporciona una tangente adecuada, puede obligar al conductor a decelerar a una tasa incómoda e insegura, incrementando el riesgo de accidentes. La distancia mínima para esta adaptación se conoce como distancia de maniobra, y corresponde al largo mínimo que debiera tener una tangente de entrada. En la literatura se identificaron valores de distancia de maniobra que varían desde 40 a 260 m, por lo cual se hace necesario elaborar modelos locales que permitan estimarla. Así, el objetivo de este trabajo es presentar la calibración y validación de un modelo de distancia de maniobra. La calibración y validación se realizó usando 300 registros de velocidad en 23 curvas horizontales, medidas con un GPS de 10 Hz. Se obtuvo un modelo dependiente de la velocidad en la tangente de entrada y de la deflexión de la curva, con un nivel de correlación del 66 %. El modelo se usó para analizar 2520 diseños de curvas horizontales en los cuales se estableció la relación entre la consistencia del diseño, la relación distancia de maniobra / radio y la velocidad en la tangente de entrada. Se determinó que en la medida que la distancia de maniobra es más pequeña para velocidad en la tangente de entrada elevada, los diseños tienden a ser más inconsistentes y, por tanto, más inseguros.

Palabras clave: distancia de maniobra, velocidad de operación, consistencia del diseño, caminos bidireccionales

1.- INTRODUCCIÓN

El diseño geométrico de curvas horizontales se realiza considerando una velocidad de proyecto que determina los parámetros mínimos (o máximos en su caso) de diseño, para posteriormente dimensionar el radio y peralte usando velocidad de diseño y/o específica, dependiendo de la norma de diseño. Posteriormente se determinan los elementos geométricos que describen espirales y arco circular que típicamente constituyen la geometría de una curva horizontal. Este enfoque de diseño, ampliamente extendido en las normativas de diseño en Chile y el mundo, presupone que el conductor nunca excede la velocidad específica o de diseño, y que además se adapta gradualmente a la curvatura circular siguiendo la trayectoria espiral que permite incrementar gradual y controladamente la aceleración lateral.

Sin embargo, las normativas y la práctica de diseño no consideran los aspectos operativos. Por un lado es posible que una parte de la población de conductores exceda la velocidad específica o de diseño violando los supuestos teóricos de las normativas. Por otro lado, es posible que la longitud de la tangente de entrada a una curva horizontal influya en la forma en que un conductor la enfrente, siendo esperable que tangentes de entrada muy largas induzcan a los conductores a incrementar su velocidad y que longitudes de tangente muy cortas, no permiten a los conductores ajustar su velocidad antes de entrar a una curva horizontal.

En ambos casos es previsible, como lo explica Bakov (1968), que la velocidad de operación de un conductor sea excesiva en contraste con la velocidad de diseño o específica, generando una condición de riesgo que McLean (1981) y Lamm *et al.* (2002) denominan inconsistencia del diseño geométrico, y que se traduce en un aumento en el riesgo de accidentes, como lo ha verificado Lamm *et al.* (1999). Por tanto, la tangente de entrada constituye un elemento geométrico que influye directamente en el nivel de seguridad que ofrece el diseño de una curva horizontal (Lamm *et al.*, 1988). Por tanto, conocer la distancia de maniobra resulta particularmente importante para los diseñadores, por cuanto les entrega una herramienta adicional para estimar el nivel de seguridad que puede ofrecer el diseño de una curva horizontal.

De acuerdo a lo anterior, el objetivo de la investigación fue proponer un modelo de distancia de maniobra para distintas curvas horizontales aisladas, de modo que permita a los diseñadores estimar la longitud de la tangente de entrada mínima en curvas horizontales tales que permitan a los conductores adaptar su velocidad de circulación a las condiciones geométricas de diseño. El procedimiento de investigación consideró las siguientes etapas: a) identificación en el estado del arte de las variables que potencialmente explican la longitud de la distancia de maniobra. Esta etapa se desarrolló complementando la base de información elaborada por García (2014). Posteriormente se utilizó la base de datos de mediciones de velocidad elaborada por Echaveguren y Díaz (2013), quien obtuvo 552 registros de velocidad, aceleración y geometría en 23 curvas horizontales aisladas usando un *logger* de 10 Hz con tecnología GPS. En esta base de datos se identificaron las distancias de maniobra usando los tres registros antes indicados para conformar finalmente una base de datos con variables explicativas geométricas y operativas, además de la propia distancia de maniobra. Con estos datos se calibró y validó un modelo de distancia de maniobra que posteriormente se utilizó en un caso de estudio para analizar la consistencia de diseños geométricos de curvas horizontales diseñadas por Echaveguren y Cárdenas (2013) según los criterios de diseño del Manual de Carreteras de Chile.

2. LA DISTANCIA DE MANIOBRA EN CURVAS HORIZONTALES AISLADAS

Las curvas horizontales aisladas son arcos curvos que enlazan dos tangentes suficientemente distanciadas de otro elemento curvo del trazado. Operativamente una curva horizontal aislada consta de una secuencia de elementos geométricos: tangente – espiral – arco circular – espiral – tangente, cuya especificación depende del ángulo de deflexión de los ejes de replanteo, de la velocidad de proyecto y de la velocidad específica.

La distancia de maniobra es la longitud a lo largo de la cual los conductores realizan el proceso de adaptación de la velocidad antes de ingresar a una curva horizontal. Incluir el concepto de distancia de maniobra en el diseño de curvas horizontales resulta importante para asegurar que el conductor disponga del tiempo y el espacio adecuado para identificar la curvatura del trazado y ajustar su velocidad antes de ingresar a la curva horizontal. De acuerdo con esto, la distancia de maniobra se puede considerar en términos prácticos como la longitud mínima de la tangente de entrada de una curva horizontal.

En el caso de curvas de inflexión en “S” Henríquez (2014) plantea que conocer esta distancia resulta particularmente importante para los diseñadores, ya que permite determinar la influencia que tiene la curva horizontal en la tangente de entrada a la curva siguiente y viceversa, permitiendo generar criterios que definan la consistencia entre ambos elementos geométricos. En términos de diseño geométrico, la distancia de maniobra debe proporcionar una longitud suficiente para entregar información adecuada al conductor de la curva horizontal próxima, además debe permitir al conductor identificar la curvatura del trazado y seleccionar una velocidad apropiada para ingresar a la curva.

En la Figura 1 se muestra la ubicación de la distancia de maniobra (DM) en el entorno de una curva horizontal aislada. En ella se identifica la tangente de entrada y los puntos característicos de una curva horizontal aislada (PTe, Pk, Mc y Fk) que corresponden al principio de tangente y principio, mitad y fin de curva horizontal. El ángulo de deflexión (ω) corresponde al ángulo que se forma entre los dos ejes de replanteo sobre el cual se inserta la curva horizontal (MOP, 2016).

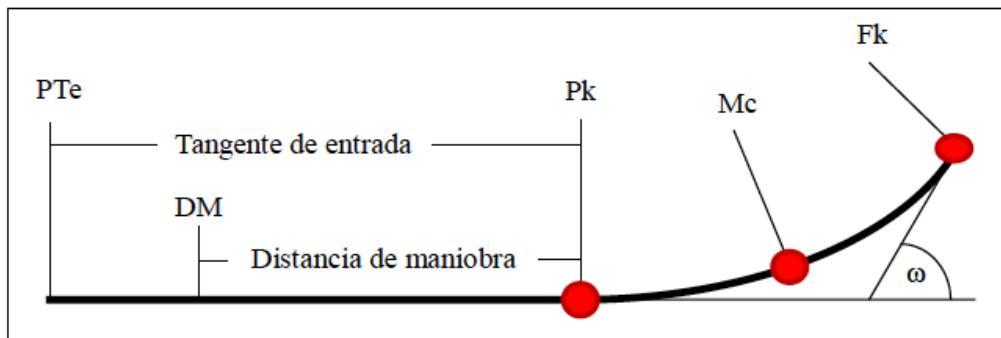


Figura 1 Distancia de maniobra en una curva horizontal aislada

Una curva horizontal ocupa un espacio operativo mayor que el espacio geométrico, puesto que el conductor adapta su velocidad en la tangente de entrada para ingresar a la curva horizontal, acelerando, decelerando, o manteniendo su velocidad dependiendo de la relación entre la longitud de la tangente de entrada y la curvatura percibida (Bavkov, 1968; Campbell *et al.*, 2008).

Campbell *et al.* (2008) identificaron las componentes operativas de una curva horizontal aislada, incluyendo a la tangente de entrada como parte de la curva (Véase Figura 2). Explican que el conductor al ingresar a la tangente, adapta su velocidad en la zona de descubrimiento en función de la velocidad de circulación, la visibilidad y la curvatura. Campbell *et al.* (2008) sugieren que la distancia de descubrimiento de la curva es de entre 75 y 100 m o de 4 segundos, dependiendo de la velocidad de circulación en la salida de la zona de aproximación.

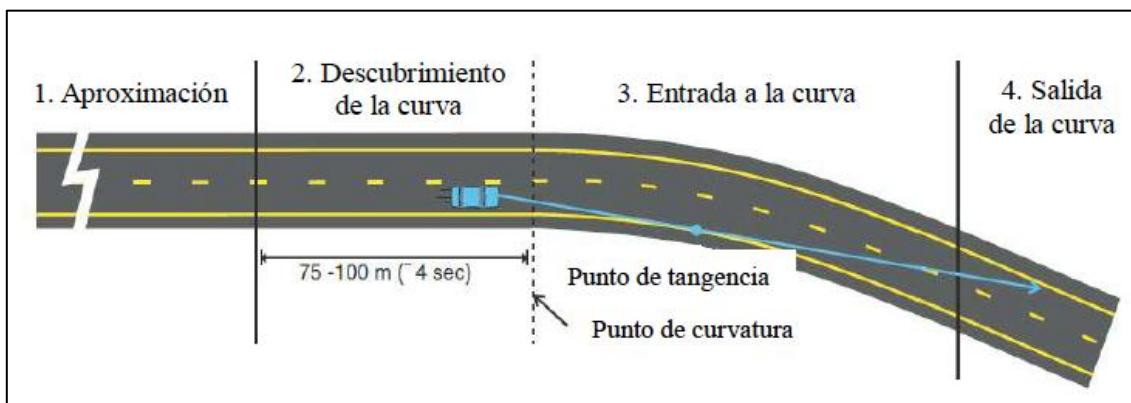


Figura 2 Componentes operativos de una curva horizontal (Adaptado de Campbell *et al.*, 2008)

En la etapa de aproximación los conductores localizan la curva horizontal, obtienen información sobre de la señalización vertical y horizontal y comienzan a realizar los ajustes iniciales de velocidad. En la etapa de descubrimiento de la curva, el conductor estima la curvatura de la curva, evalúa las condiciones de la carretera, realiza ajustes adicionales de velocidad y ajusta su trayectoria para la entrada de la curva. En la tercera etapa, el conductor ajusta su velocidad basado en la curvatura y en la aceleración lateral, manteniendo la trayectoria. En la cuarta etapa, el conductor acelera y ajusta su trayectoria en base a la visibilidad hacia adelante. Bajo el esquema de Campbell *et al.* (2008), la distancia de maniobra se encuentra en la distancia de descubrimiento y eventualmente en el último tercio de la distancia de aproximación.

García (2014) recopiló valores de distancia de maniobra de diversos autores, quienes los obtuvieron en base a mediciones de campo. La Tabla 1 muestra que los valores obtenidos por estos autores varían entre 40 y 463 m, lo cual implica que existen condiciones particulares que se deben tomar en cuenta tanto en mediciones de campo como en la modelación y que no es posible adoptar arbitrariamente un valor determinado de la literatura para propósitos de diseño.

Tabla 1. Distancias de maniobra obtenidos por diversos autores (Adaptada de García, 2014)

Autores	Distancia de maniobra (m)
Lamm <i>et al.</i> (1988)	213 – 219
Bennett (1994)	150 – 463
Collins y Krammes (1996)	120
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2000)	200
Perco y Robba (2005)	40 – 280
Bella (2008)	100 – 322
Perco (2008)	160

Autores	Distancia de maniobra (m)
Hu y Donnell (2010)	122
Dell'Acqua y Russo (2010)	menos de 200
Pérez <i>et al.</i> (2013)	100 – 200

3. MODELACION DE LA DISTANCIA DE MANIOBRA

3.1. Base de datos

La base de datos fue obtenida en terreno por Echaveguren y Díaz (2013) quienes estimaron velocidades de operación y geometría de curvas horizontales. Posteriormente Henríquez (2014) estimó perfiles de aceleraciones longitudinales en las mismas curvas considerando tangentes de entrada y las curvas horizontales. Echaveguren y Díaz (2013) obtuvieron 23 geometrías de curvas horizontales con radios geométricos que variaban entre 190 y 687 m, ángulos de deflexión entre 17 y 107 y desarrollos totales de curvatura entre 96 y 402 m. Asumiendo que el punto de inicio del descubrimiento de la curva de Campbell *et al* (2008) coincide con el inicio de la deceleración, Henríquez (2014) estimó en dicho punto velocidades de operación entre 59 y 120 km/h. De este modo, la base de datos quedó conformada por: distancia de maniobra (DM, en m), velocidad de operación en la tangente de entrada (Vte, en km/h), radio de curvatura (R, en m), desarrollo de la curva (D, en m) y ángulo de deflexión de los ejes de replanteo (ω , en gradiéntes). En cada curva se contó con aproximadamente 300 registros.

3.2. Formulación de modelos

Para definir formas funcionales tentativas, en primer lugar se realizó un análisis de correlación de Pearson a las variables explicativas antes mencionadas, obteniéndose la Tabla 2 como resultado (el signo “-“ denota correlación inversa). Se puede ver que las variables: deflexión, desarrollo y velocidad en la tangente de entrada contribuyen equilibradamente a explicar la distancia de maniobra, por lo cual la especificación de modelos debiese incluir dichas variables.

Tabla 2: Correlaciones entre variables explicativas de la distancia de maniobra

Variable	ω	Vte	R	D	Dm
ω	1				
Vte	-0,09	1			
R	-0,60	+0,32	1		
D	+0,46	+0,25	+0,31	1	
DM	+0,24	+0,30	+0,05	+0,32	1

Posteriormente se probaron diversas formas funcionales a partir de las cuales se identificaron 7 modelos plausibles de calibrar, los que se presentan en la Tabla 3. Los coeficientes a , b_i , c_i corresponden a los coeficientes de calibración. El resto de variables tiene el mismo significado y unidades descritas en la sección 3.1.

Tabla 3. Especificaciones de modelos candidatos a calibración

Modelo	Especificación
M1	$DM = a + b_1\omega + b_2Vte$
M2	$DM = \omega^{c_1}Vte^{c_2}$
M3	$DM = \omega^{c_1} + Vte^{c_2}$
M4	$DM = \frac{1}{a + b_1\ln(\omega) + b_2\ln(Vte)}$
M5	$DM = b_1\ln(\omega) + b_2\ln(Vte)$
M6	$DM = b_1\omega + b_2Vte$
M7	$DM = a + \omega^{c_1} + Vte^{c_2}$

3.2. Calibración y validación de modelos

Para calibrar los modelos se consideró el 75 % de la base de datos. El 25 % restante se utilizó para validar. El tamaño de la muestra de calibración fue de 225 y el de validación de 75 registros. La Tabla 4 muestra los parámetros de calibración obtenidos para los 7 modelos de la Tabla 2. Bajo el coeficiente entre paréntesis se muestra el coeficiente t-student. Se muestra también el coeficiente de correlación (R^2) y el error estándar de la estimación (S, en m).

Tabla 4. Coeficientes de calibración de modelos de DM

Modelo	a	b ₁	b ₂	c ₁	c ₂	R ²	S (m)
M1	-166,120 (-3,38)	+4,170 (+17,09)	+3,700 +7,43)			0,65	84
M2				+0,547 (+16,59)	+0,849 (+28,056)	0,63	87
M3				+1,280 (+107,49)	+1,210 (+120,64)	0,64	86
M4	-20,870 (-3,07)	+5,490 (+15,42)	+2,50 (+1,756)			0,63	87
M5	-2166,730 (-9,73)	+224,55 (+16,38)	+375,84 (+8,09)			0,64	87
M6		+3,897 (+16,43)	+2,110 (+13,35)			0,63	87
M7	-40,510 (-1,17)			+1,280 (+105,08)	+1,240 (+46,96)	0,64	86

A partir de los modelos de la Tabla 4 se seleccionó para validar el modelo M1, dado que es el que posee el menor error estándar. Este modelo expresa que la distancia de maniobra se incrementa en tanto la velocidad en la tangente de entrada (Vte) es mayor y en tanto el ángulo de deflexión es mayor. Esto es consistente teniendo en cuenta que mientras mayor sea la velocidad con que un vehículo ingresa a la fase de descubrimiento de la curva y esta sea más cerrada (es decir con mayor deflexión) entonces el conductor requiere una mayor distancia de adaptación en función de la máxima deceleración tolerable.

En la Figura 3 se muestra la validación del modelo de distancia de maniobra. Se observa que existe una correlación razonable entre la distancia estimada y la distancia de maniobra modelada.

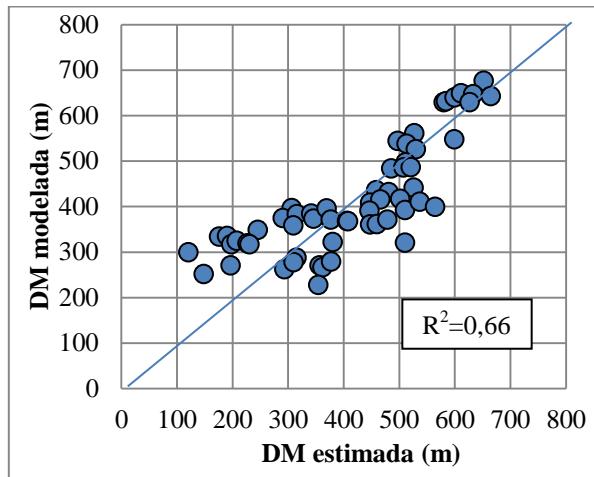


Figura 3. Correlación entre la distancia de maniobra estimada y modelada

4. CASO DE ESTUDIO

Como ya se mencionó, la distancia de maniobra corresponde a la mínima longitud de la tangente de entrada a una curva horizontal, tal que a la velocidad de operación permita a un conductor descubrir la curva y adaptar su velocidad para ingresar de manera segura a ella. La aplicación práctica de este resultado para el diseño, se manifiesta en la definición de valores adecuados de la razón longitud de tangente/radio del arco circular de la curva (L/R). Los valores adecuados serán aquellos que para la velocidad de entrada en la tangente y para la geometría de la curva a diseñar, mantengan el nivel de consistencia en la categoría “bueno”. En esta parte del artículo, se discute esta caso en base al análisis de diferentes diseños de curvas horizontales de acuerdo al Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2016).

4.1. Geometrías de las curvas horizontales

Para construir las geometrías de las curvas horizontales se definieron valores para los siguientes elementos de diseño: ángulo de deflexión, velocidad de diseño y radio geométrico. Se definieron valores de ángulo de deflexión comprendidos entre 15 y 90 gradianes con un intervalo de 15 gradianes. Con esto se tienen seis ángulos de deflexión distintos de curvas horizontales simuladas. El valor mínimo de 15 g y el valor máximo de 90 g fueron adoptados luego de revisar los ángulos de deflexión de la base de datos de modelación con la cual se calibró el modelo. Estas curvas comprenden ángulos entre 17,67 y 106,1 g. La velocidad específica define las características geométricas de la carretera en el diseño (MOP, 2016). Se utilizaron valores entre 40 y 80 km/h, con un intervalo de 10 km/h, debido a que la evidencia empírica muestra que el problema de inconsistencia se acentúa en geometrías diseñadas con estas velocidades de diseño. El radio es la variable que define el arco circular de la curva horizontal. Se adoptaron radios de 50, 80, 100, 120, 150, 200, 300 500 y 700 m.

4.2. Estimación de velocidades de operación

Para estimar la velocidad de operación en los puntos característicos de una curva horizontal aislada ($V_{85,Pk}$, $V_{85,Mc}$, $V_{85,Fk}$ y $V_{85,Te}$), se utilizaron los modelos obtenidos por Echaveguren y Díaz (2013). Los modelos calculan la velocidad del percentil 85 como estimador de la velocidad de operación.

$$V_{85,Pk} = 51,3 + 0,524 V_{85,Te} - \frac{1811,9}{R} \quad (1)$$

$$V_{85,Mc} = V_{85,Pk} - \frac{61,31}{\sqrt{R}} \quad (2)$$

$$V_{85,Fk} = 1,05 V_{85,Mc} + 0,103\sqrt{R} \quad (3)$$

En donde $V_{85,Pk}$, $V_{85,Mc}$, $V_{85,Fk}$ corresponden a las velocidades de operación en km/h en el principio, mitad y fin de curva respectivamente. $V_{85,Te}$ es el valor de la velocidad en la tangente de entrada en km/h y R corresponde al radio de la curva horizontal en m. Se definieron 15 valores de velocidad de operación al inicio de la tangente de entrada, comprendidos entre los 50 y 120 km/h con un intervalo de 5 km/h. Por cada geometría simulada se construyeron 15 perfiles de velocidad de operación, cada uno asociado a una velocidad en la tangente de entrada.

4.3. Configuración de las geometrías simuladas

Para construir las curvas horizontales simuladas se procedió de la siguiente manera: a) Se realizaron todas las combinaciones posibles para el par $\{V_e, \omega\}$, resultando un total de 30 combinaciones; b) posteriormente estas 30 combinaciones se re-combinaron con los radios geométricos seleccionados. Las combinaciones se comprobaron de acuerdo al Manual de Carreteras (MOP, 2016) para eliminar aquellas normativamente no factibles. Se obtuvieron 168 geometrías simuladas distintas, que cumplen con el trío: $\{V_e, \omega, R\}$; c) cada una de las 168 geometrías simuladas fueron combinadas con 15 velocidades en el inicio de la tangente de entrada, resultando así 2.520 casos distintos para analizar. Estos casos consideran cuatro variables: $\{\omega, R, V_d, V_{te}\}$.

4.4. Evaluación de consistencia

Se evaluó para cada una de las curvas simuladas la consistencia del diseño geométrico usando el criterio I de Lamm (Véase Echaveguren y Cárdenas, 2013) para la condición de velocidad específica fija y ángulo de deflexión variable. El nivel de consistencia se calculó usando conjuntamente los modelos de velocidad de operación (Ec. 1, 2, y 3) para estimar la velocidad en la mitad de la curva y posteriormente calcular el índice de consistencia de Lamm según la Ecuación 4.

$$IC1 = \text{Velocidad específica} - \text{Velocidad de operación} \quad (4)$$

Los resultados obtenidos para los dos casos se muestran en las Figuras 4 y 5, en las cuales se grafica el índice de consistencia de la ecuación 4 respecto de la relación L/R , siendo L la distancia de maniobra calibrada (modelo M1 de la Tabla 3). En las figuras solo se muestra un valor de velocidad específica con el propósito de ilustrar la forma de los gráficos y la relación entre las variables que definen el nivel de consistencia: L , V_{te} , R y ω .

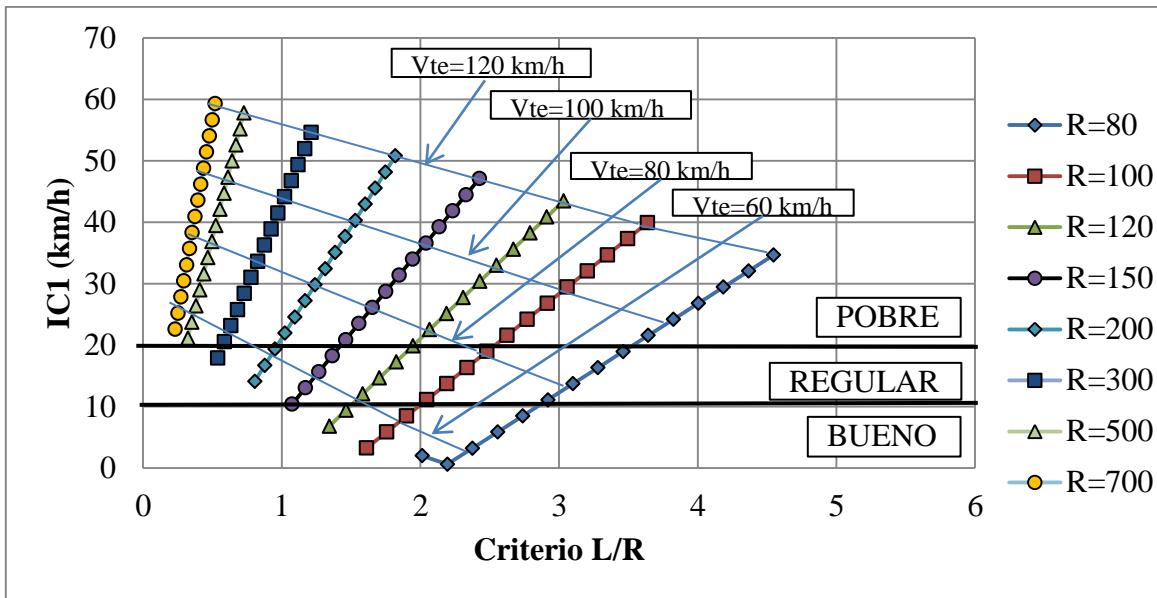


Figura 4 Curvas horizontales aisladas para $\omega=15$ g y $V_e=50$ km/h

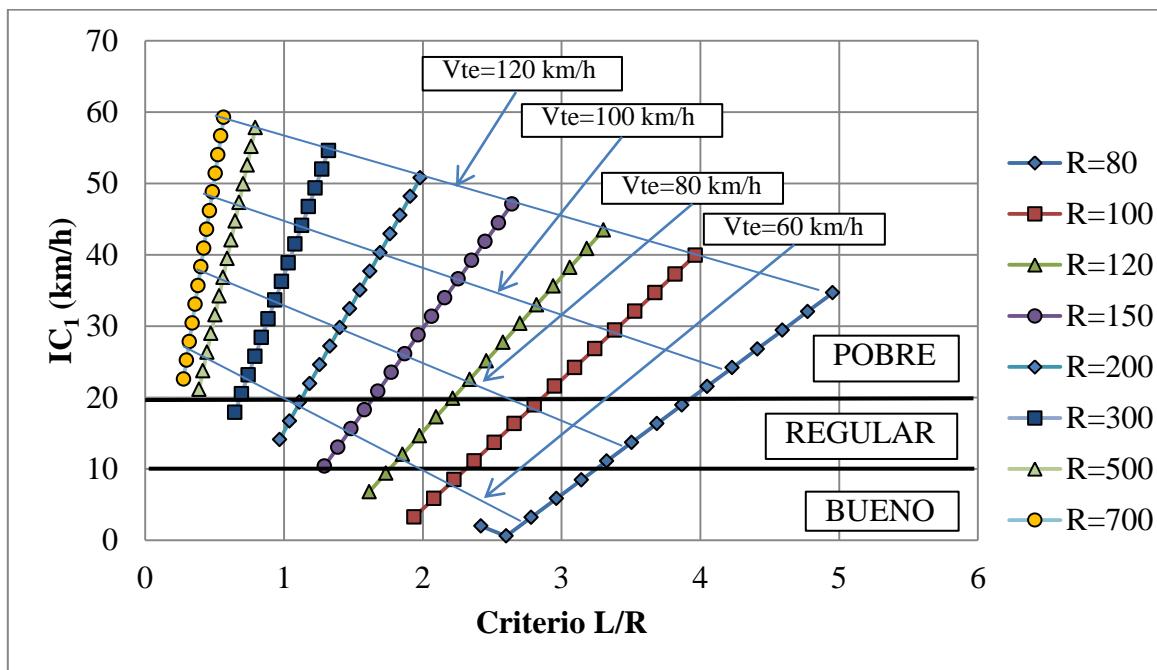


Figura 5 Curvas horizontales aisladas para $\omega=45$ g y $V_e=50$ km/h

Se puede apreciar en ambas figuras que el nivel de consistencia tiende a disminuir cuando L/R es más pequeño para velocidades en la tangente de entrada elevadas, lo cual es evidencia de la falta de una distancia adecuada para que el conductor adapte su velocidad a la velocidad segura de operación en una curva. El caso contrario ocurre cuando L/R aumenta. Los diseños tienden a acercarse más hacia el diseño consistente. Asimismo, la variación del ángulo de deflexión no incide en el nivel de consistencia calculado por el criterio I de Lamm pero sí en el valor del

criterio L/R, debido a que el valor de L corresponde al valor calculado de la distancia de maniobra y para curvas más cerradas la distancia de maniobra será mayor.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo consistió en calibrar un modelo de distancia de maniobra para curvas horizontales aisladas y encontrar relaciones entre la longitud de la tangente de entrada y el radio de la curva horizontal, que definan el nivel de consistencia del diseño geométrico. Para lograr el resultado se tomó una base de datos de un estudio previo, la cual contiene mediciones de velocidad de 23 curvas horizontales, en donde se estimó la distancia de maniobra, a partir de 238 registros de velocidad obtenidas con un GPS logger de 10 Hz. De las variables que contiene la base de datos, se identificó que las variables independientes con mejores valores en la correlación para explicar la distancia de maniobra son el ángulo de deflexión de la curva y la velocidad de operación en la tangente de entrada.

Los valores de distancia de maniobra identificados en la literatura varían entre 40 y 462,6 m. Este amplio rango de valores justifica la necesidad de calcular un modelo de distancia de maniobra para cada curva horizontal, ya que la distancia de maniobra es específica de cada curva al depender de variables geométricas y operativas.

Se obtuvo una buena correlación en todos los modelos calibrados ($R^2 = 0.64$). La validación arrojó una correlación de 0.66, lo cual indica una razonable validez del modelo. Esto implica que el ángulo de deflexión de la curva horizontal y la velocidad en la tangente de entrada son buenos estimadores de la distancia de maniobra.

El modelo de distancia de maniobra es útil tanto para el análisis de consistencia a través de la razón L/R como para la construcción de perfiles de velocidad. En el este último caso, permite calcular la distancia desde el principio de la curva (Pk) desde donde comienza a decelerar el conductor para ajustar la velocidad. Lo cual permite además estimar la deceleración media, valor de especial relevancia para el análisis de consistencia en curvas considerando el efecto de la tangente de entrada.

El modelo se desarrolló específicamente para vehículos ligeros. Por tanto, es esperable que a igualdad de geometría y velocidad en la tangente de entrada, la distancia de maniobra sea diferente para otras clases de vehículos, como los vehículos pesados de una o más unidades, buses interurbanos, mini buses o SUV.

El análisis del caso de estudio permite concluir cada combinación de ω , R y Ve tendrá exclusivos intervalos del criterio L/R que definirán la consistencia del diseño geométrico y el nivel de consistencia de cada curva horizontal, dependerá conjuntamente de la geometría y de la velocidad de operación en la tangente de entrada. Asimismo, calcular los intervalos de consistencia del criterio L/R para cada una de las combinaciones geométricas de curvas horizontales aisladas, es posible definir la consistencia del diseño geométrico antes o durante el diseño, es decir, generar un manual en donde se incluyan todas las combinaciones geométricas posibles y se indique el nivel de consistencia que tengan éstas, la cual dependerá exclusivamente de la velocidad de operación en la tangente de entrada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT) del Ministerio de Educación de Chile por el financiamiento otorgado al proyecto FONDECYT 1160128, dentro del cual se enmarca este trabajo.

REFERENCIAS

- Bavkov, V. (1968). Road Design and Traffic Safety. *Traffic Engineering&Control*, 9, 236 – 239.
- Bella, F. (2008). Assumptions of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates: verification in the driving simulator. 87th Annual Meeting Transportation Research Board. Washington, D.C. Estados Unidos.
- Bennett, C. R. (1994). A speed prediction model for rural two-lane highways. Tesis de Doctorado. Universidad de Auckland. Nueva Zelanda.
- Campbell, J., C. Richard y Graham, J. (2008). Human factors guidelines for road systems. NCHRP Report 600-B. Transportation Research Board. National Research Council, Estados Unidos.
- Collins, K. y Krammes, R. (1996). Preliminary validation of a speed- profile model for design consistency evaluation. *Transportation Research Record*, 1523, 11 – 21.
- Dell'Acqua, G.L. y Russo, F. (2010). Speed factors on low-volume roads for horizontal curves and tangents. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(2), 89 – 97.
- Echaveguren, T. y Cárdenas, E. (2013). Comparación de métodos de análisis de consistencia de curvas horizontales aisladas usando datos empíricos. XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago. Chile.
- Echaveguren, T. y Díaz, A. (2013). Perfiles de velocidad de operación para curvas horizontales aisladas. XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago, Chile.
- Fitzpatrick, K., L. Elefteriadou, D. Harwood, J. Collins, J. McFadden, I. Anderson, R. Krammes, N. Irizarry, K. Parma, K. Bauer y K. Passetti (2000). Speed Prediction for two-lane rural highways. Publication FHWA – RD – 99 – 171. Federal Highway Administration, Estados Unidos.
- García, Y. (2014). Aceleraciones y desaceleraciones de vehículos livianos en caminos de montaña. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
- Henríquez, C. (2014). Caracterización estadística de aceleraciones longitudinales medidas con GPS en caminos rurales. Memoria de Titulo Ingeniero Civil, Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.
- Hu, W. y Donnell, E. (2010). Models of acceleration and deceleration rates on a complex two-

- lane rural highway: results from a nighttime driving experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 13, 397 – 408.
- Lamm, R., E. Choueiri y Hayward, J. (1988). Tangent as an independent design element. *Transportation Research Record*, 1195, 123 – 131.
- Lamm, R., B. Psarianos y T. Mailaender (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. Nueva York: McGraw – Hill.
- Lamm, R. Psarianos. B. y Cafiso, S. (2002). Safety evaluation process for two – lane rural roads. A 10 – year review. *Transportation Research Record*, 1796, 51 – 59.
- McLean, J. (1981). Driver speed behavior and rural road alignment design. *Traffic Engineering & Control*, 4, 208 – 211.
- Ministerio de Obras Públicas (2016). Instrucciones y criterios de diseño. En *Manual de Carreteras Volumen 3*, Santiago, Chile.
- Perco, P. (2008). Influence of the general character of the horizontal alignment on the operating speed of two-lane rural roads. *Transportation Research Record*, 2075, 16 – 23.
- Perco, P. y Robba, A. (2005). Evaluation of the deceleration rate for the operating speed-profile model. 3rd International SIIIV Congress: People, Land, Environment and Transport Infrastructures - Reliability and Development. Bari: Società Italiana Infrastrutture Viarie.
- Pérez, A. M., Camacho, F. y García, A. (2013). Study of tangent-to-curve transition on two-lane rural roads based on continuous speed profiles. *Journal of Transportation Engineering*. 139(11), 1048 – 1057.