



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



programa de infraestructura
del transporte

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-USVT-003-14

EVALUACIÓN DE SEGURIDAD VIAL

Construcción de la Ruta Nacional No. 4, Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper Licitación Pública No. 2011 LI-000037-32702 (Etapa pre-construcción)

Preparado por:

Unidad de Seguridad Vial y Transporte

San José, Costa Rica
Febrero, 2014

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 47 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.
Preparado por: Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR diana.iimenez@ucr.ac.cr



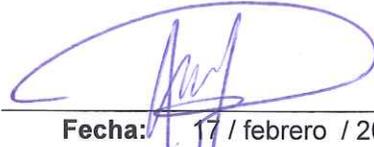
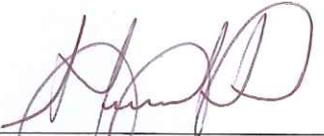
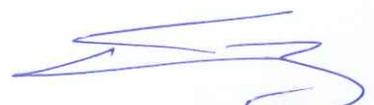
1. Informe LM-PI-USVT-003-14		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: EVALUACIÓN DE SEGURIDAD VIAL: Proyecto Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper, Ruta Nacional No. 4.		4. Fecha del Informe Febrero, 2014
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen Se realiza una evaluación de seguridad vial de los planos de diseño geométrico del proyecto de construcción de la Ruta Nacional No. 4, tramo Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. El informe surge como respuesta a la solicitud planteada, por la Unidad de Auditoría Técnica (UAT) del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) mediante el memorando LM-UAT-02-2013. El proyecto se ubica entre los cantones Sarapiquí de Heredia y San Carlos de Alajuela, entre los poblados Bajos de Chilamate y Vuelta de Kooper respectivamente. El entorno de la vía es predominantemente rural, con amplias zonas dedicadas a cultivos agrícolas. El diseño geométrico mostró una buena consistencia con respecto a la expectativa del conductor, solo en un caso se obtuvo un tramo de consistencia local deficiente. La verificación del cumplimiento de normativa de diseño geométrico se considera aceptable. El principal incumplimiento está asociado con la distancia de visibilidad disponible y la requerida, dado que se determinaron varios tramos con limitaciones en este parámetro que podría afectar negativamente el nivel de seguridad del proyecto. Las principales recomendaciones son: realizar estudios de movilidad peatonal y de ciclistas para determinar la factibilidad de incorporar facilidades adicionales. Revisar la ubicación de las zonas de adelantamiento permitido y la señalización vial en aquellos puntos donde la distancia de visibilidad está por debajo del estándar de la vía. Debe tomarse en consideración que el alineamiento horizontal de este proyecto es predominantemente plano con algunas ondulaciones y pendientes, por lo que es posible que la velocidad de operación sea relativamente alta		
10. Palabras clave Seguridad vial, Chilamate-Vuelta de Kooper, consistencia, diseño geométrico, Ruta 4	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 54
13. Preparado por:		
Ing. Erick Acosta Hernández Unidad de Seguridad Vial y Transporte 	Ing. Federico Puscar Schapira Asistente Unidad de Seguridad Vial y Transporte 	
Fecha: 17 / febrero / 2014	Fecha: 17 / febrero / 2014	
14. Revisado por:		
Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal Externo LanammeUCR 	Ing. Diana Jiménez Romero, MSc, MBA Coordinadora Unidad de Seguridad Vial y Transporte 	15. Aprobado por:
Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph. D. Coordinador General PITRA 		
Fecha: 17 / febrero / 2014	Fecha: 17 / febrero / 2014	Fecha: 17 / febrero / 2014

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 OBJETIVO DEL INFORME	6
1.2 ALCANCE DEL INFORME	7
1.3 ANTECEDENTES.....	8
1.4 METODOLOGÍA.....	8
1.5 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL Y JERARQUÍA DE LA VÍA.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 ACERAS	13
2.2 SEÑALAMIENTO VIAL	14
2.3 BAHÍAS DE AUTOBUSES	15
2.4 TRÁFICO CALMADO	17
2.5 CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA VÍA	20
2.6 VELOCIDAD DE DISEÑO Y DE OPERACIÓN	22
2.7 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO.....	24
2.8 PROGRAMA IHSDM	26
3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE SEGURIDAD VIAL.....	28
3.1 REVISIÓN DE NORMATIVA DE DISEÑO	28
3.2 ALINEAMIENTO HORIZONTAL	29
3.3 ALINEAMIENTO VERTICAL.....	31
3.4 DISTANCIA DE VISIBILIDAD DISPONIBLE Y REQUERIDA	33
3.5 DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO	39
3.6 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO	39
3.7 INTERSECCIONES.....	44
3.8 FACILIDADES PARA PEATONES Y CICLISTAS.....	45
4. CONCLUSIONES.....	47
5. RECOMENDACIONES	49
6. REFERENCIAS.....	50



INFORME DE EVALUACIÓN DE SEGURIDAD VIAL

"Construcción de la Ruta Nacional No. 4, Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. Licitación Pública No. 2011 LI-000037-32702"

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de una evaluación de seguridad vial es identificar vulnerabilidades o riesgos potenciales de accidente para todos los usuarios de un tramo de carretera existente o en proyecto, con el fin de establecer un diagnóstico de su condición y valorar la necesidad de implementar medidas de mitigación.

Las evaluaciones de seguridad vial también son una herramienta que ayuda a asegurar que los aspectos de seguridad vial estén considerados en todas las etapas de un proyecto vial.

Para el caso de carreteras en construcción, se realizan evaluaciones de seguridad vial de la vía en la fase constructiva, de modo que se brinde a la Administración insumos para la mejora continua de la seguridad vial de la carretera antes de su apertura.

En las evaluaciones de seguridad vial que ejecuta el LanammeUCR, se comparan las prácticas que se realizan en Costa Rica con respecto a las mejores prácticas internacionales en el tema de seguridad vial y a la normativa existente, con el propósito de emitir recomendaciones para mejorar la Ingeniería de Transporte en Costa Rica en torno a la seguridad vial.

1.1 Objetivo del informe

El objetivo general de este informe es evaluar el diseño geométrico del proyecto Chilamate-Vuelta de Kooper en la Ruta Nacional No. 4 desde la óptica de la seguridad vial.

1.2 Alcance del informe

Esta evaluación se realiza a partir de los planos de diseño geométrico del proyecto elaborados para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, por medio de la Licitación Pública Internacional "Construcción de la Ruta Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. Licitación Pública No. 2011 LI-000037-32702" y las especificaciones técnicas del proyecto provistas por la Unidad de Auditoría Técnica.

El contenido del informe radica en la evaluación de dos ejes temáticos principales, los cuales se indican a continuación:

I. Seguridad vial del diseño geométrico

La evaluación del diseño geométrico comprende la valoración de la consistencia del diseño geométrico, la cual toma en cuenta características de los carriles de ascenso, visibilidad disponible en curvas verticales y horizontales, calidad del diseño de intersecciones con vías principales, facilidades para usuarios vulnerables y diseño de márgenes de la vía. Además, toma en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de intersecciones y distancia entre ellas
- Número y tipo de carriles
- Composición del tránsito en la nueva carretera
- Funcionalidad de la carretera dentro de la Red Vial Nacional
- Condiciones meteorológicas
- Velocidad
- Secciones transversales
- Pendientes transversales y longitudinales
- Visibilidad
- Diseño de intersecciones
- Transporte público e infraestructuras
- Facilidades para usuarios vulnerables
- Cumplimiento de normativa vigente

- Tratamiento de márgenes de la vía
- Señalización y demarcación vial

II. *Capacidad vial del diseño propuesto*

La evaluación de la capacidad se realiza para determinar el nivel de servicio que el diseño geométrico le ofrece a los usuarios de la vía, partiendo del principio de que una vía congestionada aumenta el riesgo de que los usuarios de la vía realicen maniobras temerarias.

Este tema fue abordado previamente en el informe LM-PI-USVT-002-14 titulado "Revisión de la estimación del Tránsito Promedio Diario Proyecto "Construcción de la Ruta Nacional No. 4, Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper (LanammeUCR, 2014), por lo que su contenido no se incluye en este informe.

1.3 Antecedentes

El informe consiste en la evaluación de seguridad vial de los planos de diseño geométrico del proyecto de construcción de la Ruta Nacional No. 4, tramo Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. Este informe surge como respuesta a la solicitud planteada, por la Unidad de Auditoría Técnica (UAT) del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) mediante el memorando LM-UAT-02-2013, con fecha 30 de enero de 2013.

La información aportada por la Unidad de Auditoría Técnica del LanammeUCR consiste en los planos finales de diseño geométrico y señalización vial del proyecto solicitados a la Unidad Ejecutora del proyecto mediante oficio LM-AT-032-2013 del 15 de abril del 2013.

1.4 Metodología

El contenido del informe, como se mencionó en el apartado 1.2, radica en la evaluación de dos ejes temáticos; a continuación se explica la metodología utilizada para cada uno:

Informe LM-PI-USVT-003-14	Fecha de emisión: 17 de febrero de 2014	Página 8 de 54
---------------------------	---	----------------

- Evaluación de seguridad vial del diseño geométrico:
La evaluación del diseño geométrico se efectuó a partir de criterios de consistencia de velocidad de operación y de diseño para carreteras de dos carriles, y utilizando como herramienta el programa de computo IHSDM versión 7.0.
Adicionalmente, se realizó una revisión del cumplimiento de normativa de diseño geométrico según la metodología de diseño definida en los términos de referencia del cartel.
- Capacidad vial de la carretera:
La metodología para evaluar la capacidad de la vía es la definida en el Manual de Capacidad de Carreteras de los Estados Unidos, HCM por sus siglas en inglés (TRB, 2010). La metodología utilizada se puede consultar en el informe LM-PI-USVT-002-14 (LanammeUCR, 2014).

Como complemento para realizar esta evaluación de seguridad vial se realizaron giras de campo los días 13, 14, 26 de junio y del 10 al 11 de setiembre del año 2013.

1.5 Clasificación funcional y jerarquía de la vía.

El proyecto consiste de la construcción de una carretera de dos carriles, uno por sentido, en un tramo de 27,09 kilómetros de la Ruta Nacional N° 4, que se ubica entre los cantones Sarapiquí de Heredia y San Carlos de Alajuela. Inicia en el tramo existente de la Ruta Nacional N° 4, en el poblado de Bajos de Chilamate (Estación 0+000), y finaliza en la intersección de la Ruta Nacional N° 4 con la Ruta Nacional N° 751 (Estación 27+090) cerca del poblado de Vuelta Kopper. El entorno de la vía es predominantemente rural, con amplias zonas dedicadas a cultivos agrícolas.

Las especificaciones del diseño geométrico del proyecto y su sección transversal típica se muestran en el Cuadro 1 y la Figura 1 respectivamente.

Cuadro 1 Características del proyecto de diseño geométrico

Tipo de carretera	Troncal Rural	
Terreno	Ondulado - Plano	
Velocidad del proyecto	100	km/h
Radio mínimo base	400	m
Radio mínimo específico	420	m
Ancho de la calzada	7,6	m
Espaldones	1,8	m
Pendiente máxima	6	%
TPD (del año 2007)	5148	veh
Derecho de vía (mínimo)	50	m
Peralte máximo en las curvas	10	%
Longitud total del proyecto	27,1	km

Nota: Según el Cartel de Licitación Pública No. 2011 LI-000037-32702 (MOPT, 2011)

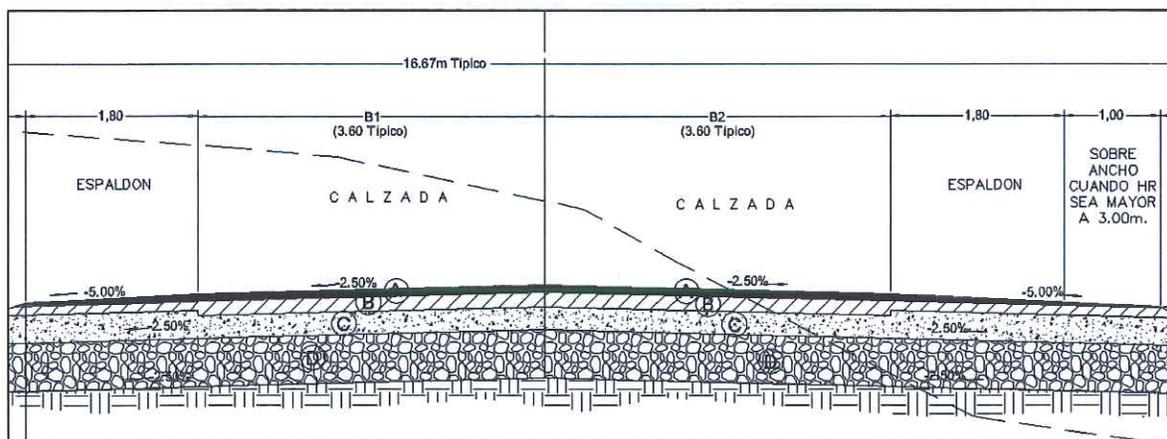


Figura 1 Sección típica del proyecto
Nota: Tomada de MOPT, (2011)

Las características funcionales de la vía especificadas por MOPT (2011), la clasifican como "Troncal-Rural", que según SIECA, (2004) son carreteras que constituyen los ejes principales y de mayor significación en la estructura de la red regional centroamericana. La velocidad de diseño utilizada para definir sus características geométricas varía entre los 80 km/h y los 60 km/h en función de la topografía del terreno.

Por otro lado, el Plan Nacional de Transporte 2011-2035 (PNT), elaborado por INECO (2011) para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, ha definido que la Ruta Nacional No. 4, incluyendo el tramo Vuelta de Kooper - Chilamate, pertenece a la Red Vial de Alta Capacidad cuyo objetivo es conducir los principales tráficos nacionales e internacionales. La Ruta Nacional No. 4, forma parte del denominado Corredor Norte-Caribe, conformado por las zonas aledañas a Peñas Blancas, San Carlos, Moín, Limón y Sixaola. y favorecer el desarrollo de las plantaciones agrícolas de la zona norte.

En el PNT 2011- 2035 también se definen las características geométricas generales de las carreteras pertenecientes a la Red de Alta Capacidad que corresponden a una velocidad de proyecto (diseño) de 120 km/h, pendiente longitudinal máxima del 6%, y una sección transversal como la mostrada en la Figura 2.

Al comparar los estándares de diseño requeridos por INECO (2011) y los mostrados en el Cuadro 1, resulta evidente la conclusión de que la vía en etapa constructiva es de características geométricas menores que la propuesta en el PNT 2011-2035, en cuanto a la cantidad de carriles y la velocidad de diseño.

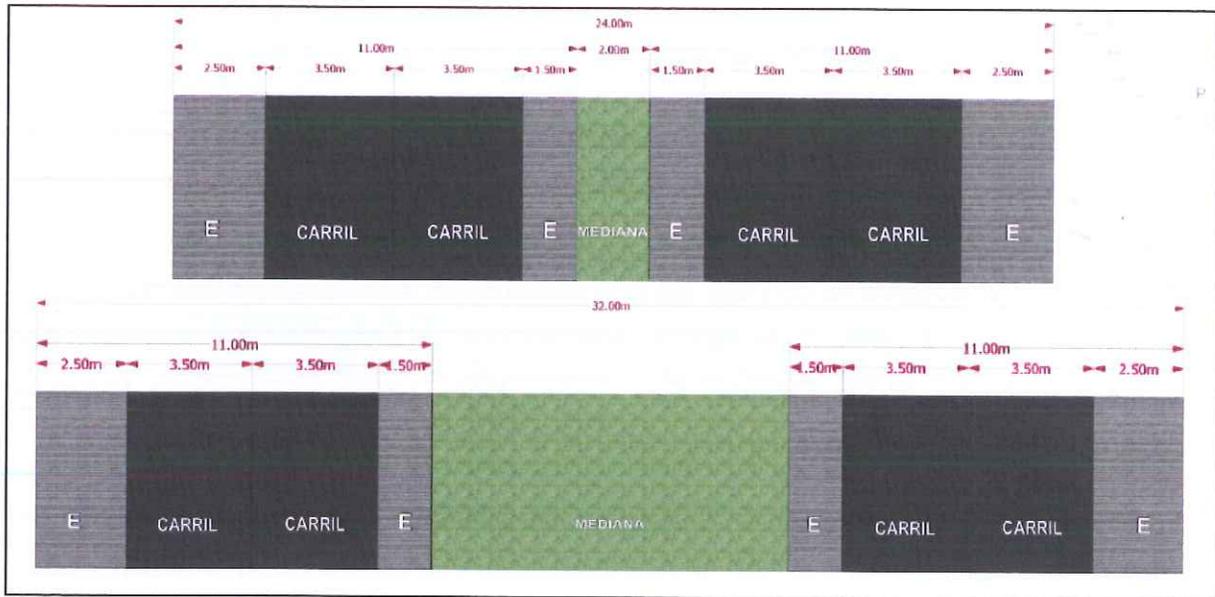


Figura 2 Secciones transversales típicas para la Red de Alta Capacidad.
Nota: Tomado de INECO, (2011)

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se desarrollan los temas que dan fundamento a las observaciones planteadas en el apartado de Resultados de la Evaluación de Seguridad Vial. Los conceptos enunciados obedecen a las buenas prácticas de la ingeniería y de la seguridad vial, recopilados a partir de la investigación bibliográfica y del criterio técnico del equipo evaluador.

2.1 Aceras

Las aceras y pasos peatonales proveen movilidad, seguridad y accesibilidad a los peatones. Reducen la incidencia de atropellos, separan el flujo de peatones de la corriente vehicular (ITE, 1998).

Se recomienda que las aceras se construyan a ambos lados de la vía, en zonas residenciales y en vías donde el flujo peatonal sea considerable. El uso del suelo, así como las características de la carretera y la densidad de viviendas, deben considerarse para determinar si deben construirse aceras (ITE, 1998).

En Centroamérica, se recomienda construir aceras en las calles y en las carreteras que carezcan de espaldón (SIECA, 2001). El ancho de las aceras puede variar entre 1m y 2m, según el tipo de carretera.

Respecto a la protección de usuarios vulnerables en los puentes, en el "Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales" (SIECA, 2001), en el Capítulo No 8, se establece:

"...En los puentes deben proveerse aceras protegidas por barreras resistentes al impacto vehicular para la circulación de peatones y para la circulación de estos en

combinación con ciclistas, toda vez que sea posible separar en forma segura ambos movimientos. Se recomienda que la acera peatonal en los puentes esté a no menos de 1,5m de la barrera mencionada...”

2.2 Señalamiento vial

La forma de regular el uso del espacio vial por parte de los peatones y ciclistas es a través de algunas señales y regulaciones específicas. Específicamente, en el caso de señales verticales, existen las señales del tipo R-7-12, R-7-13, R-7-14, R-7-15, (SIECA, 2000). También se utiliza la serie de señales R-11-1 a R-11-18, para regular la circulación de peatones y ciclistas en los cruces peatonales.

Para prevenir a los conductores sobre la presencia de peatones y ciclistas en la vía, el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito (SIECA, 2000) contempla las señales P-9-1 a P9-10, además de señales específicas para las rutas de bicicletas. El uso de señales que advierten de la presencia de ciclistas o peatones, disminuye los atropellos entre un 20% y un 30% (TAC, 2004).

Respecto al señalamiento horizontal, se establece el uso de líneas de pasos peatonales donde puedan presentarse conflictos entre los movimientos de vehículos y peatones. Se utiliza el tipo “Cebra” cuando hay un alto volumen de peatones o donde no es fácil identificar la presencia del cruce. Se ha demostrado que el hecho de demarcar un paso peatonal, provoca una disminución entre 10% y 50% de los atropellos (TAC, 2004).

Autores como Holland y Hill (2007), señalan que los elementos de seguridad hacen que se perciba un menor riesgo que el real. Es un comportamiento conocido que los peatones experimentan un falso sentimiento de seguridad cuando están “protegidos” por señalización, como también, que las personas cruzan con más cuidado cuando no existen facilidades peatonales (Ekman, 1996). De acuerdo con lo anterior, además de proveer facilidades

peatonales, debe hacerse una campaña de educación vial para mejorar el comportamiento de los usuarios.

2.3 Bahías de autobuses

La localización de las bahías de autobús debe hacerse de modo que interfiera en lo menos posible el funcionamiento vial (SIECA, 2001), por lo que para el caso de intersecciones y puntos donde se concentra movimiento de peatones, es necesario realizar un estudio para determinar la ubicación de la bahía, considerando las características de la intersección y de los movimientos que se producen.

Las bahías de autobús se deben construir separadas de la calzada, en concordancia con la seguridad vial de los usuarios de la vía y del bus, debe proveer protección a los usuarios mientras esperan el bus. Deben contar con carriles de aceleración y deceleración, rampas para el acomodo de los buses y el acceso fácil de los pasajeros, aceras de suficiente ancho para la demanda de pasajeros, casetas para protección de la intemperie y demás accesorios como bancas, gradas, pasamanos y facilidades para personas con discapacidad (SIECA, 2001).

En la Figura 3, se presenta el detalle de una bahía para autobús cuando no existe un separador entre la calzada y la bahía. Se debe utilizar la relación 3 a 1 en la longitud de entrada y 5 a 1 en la longitud de salida. Las dimensiones típicas para las bahías dependen de la cantidad de autobuses que se deban resguardar en la bahía (SIECA, 2001).

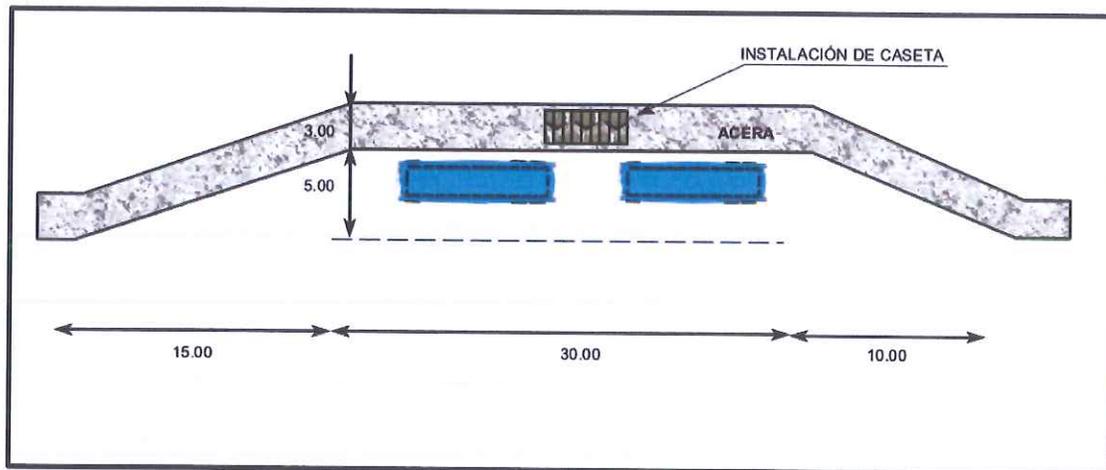


Figura 3 Esquema de una bahía de autobuses sin separador.

Nota: Tomada de SIECA, 2001.

Mesoamérica tiene un rezago en políticas nacionales que apoyen la inversión en transporte público (OPS, 2009). Es necesario que se inviertan recursos en este tema, dado que muchos de los viajes en las carreteras de la Región se realizan en transporte público y debe proveerse seguridad vial a sus usuarios.

En las Figuras 4 y 5 se muestran dos ejemplos de paradas de autobuses que se han adecuado para personas discapacitadas y, en general, para comodidad y seguridad de todos los usuarios; incluyendo los accesos hacia desarrollos aledaños (continuidad a través de aceras, pasos peatonales, etc.) La presencia de obstáculos y desniveles limita a las personas con problemas de movilidad, no pudiendo hacer uso, en muchos casos, del servicio de transporte público, el cual debe ser accesible para toda la población (LanammeUCR, 2009).



Figura 4 Accesibilidad hacia parada de autobús.

Nota: Tomada de www.bususers.org

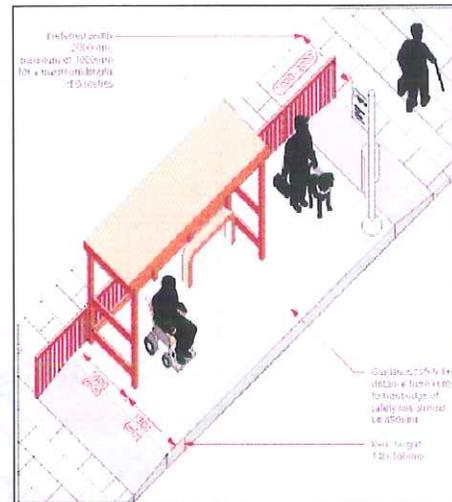


Figura 5 Esquema y dimensiones de parada de autobús

Nota: Tomada de www.dft.gov.uk

Además de las facilidades para el tránsito de los usuarios, las bahías de bus deben contar con la iluminación, de modo que se contribuya con la seguridad ciudadana.

2.4 Tráfico calmado

La probabilidad de muerte de un peatón, está relacionada con la velocidad a la que se produce el atropello (Rosén, 2009). Tal como se indica en la Figura 6 hay una probabilidad mayor de 80% de que ocurra una fatalidad si el atropello se produce a una velocidad de 60km/h.

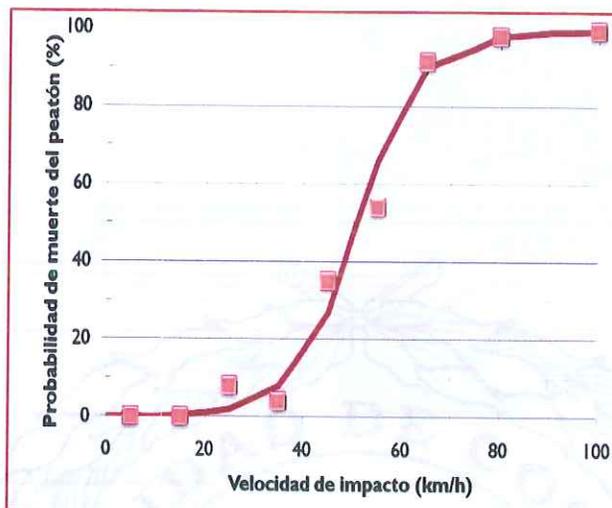


Figura 6 Probabilidad de muerte en función de la velocidad a la que se produce un atropello.

Nota: Tomada de Rosén et al., 2009

Una reducción en la velocidad de 1,6km/h puede reducir los accidentes en un promedio de 5%, mientras que un aumento en la velocidad puede aumentar los accidentes en 19% (CONASET, 2010).

Las principales ventajas de la reducción de velocidad en áreas residenciales o con gran actividad peatonal son: aumento en la visual lateral de los conductores, disminución de la probabilidad de fallecer en caso de atropello y aumento en la probabilidad de frenar a tiempo.

Para justificar la implementación de medidas para reducir la velocidad (medidas de “tráfico calmado”), se debe recolectar información de la cantidad de accidentes, la cantidad y tipo de usuarios que fallecieron en accidentes provocados por la velocidad, edad y género de las víctimas, tipo de carretera, volumen vehicular, velocidad de operación, límites de velocidad, entre otros (Global Road Safety Partnership, 2008).



Las propuestas de “tráfico calmado” incluyen modificaciones verticales u horizontales de la superficie y trazado de la vía?, uso de elementos que inciden en la percepción del conductor y medidas de gestión de tránsito.

Dentro de las medidas para calmar el tráfico de deflexiones verticales se incluyen los reductores de velocidad tipo lomo, tachuelones o trepidadores (SIECA, 2000). El diseño de dichos elementos debe garantizar que su construcción no constituya un peligro y que no produzca deterioro de los vehículos. En el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito (SIECA, 2000) se detallan los requisitos para la instalación, así como el diseño de los distintos reductores de velocidad.

Las medidas para calmar el tráfico de deflexiones horizontales se refieren a estrechamientos o restricciones al ancho de la calzada, mini-rotondas, entre otras. Los estrechamientos disminuyen entre un 30% y un 50% los atropellos (TAC, 2004). Se ha demostrado que convertir en rotonda una intersección de prioridad de dos vías de doble sentido reduce los accidentes y las demoras. Los accidentes con muertos disminuyen en 45% y con lesionados en 35% (CONASET, 2010).

Respecto a los elementos que inciden en la percepción, existen los umbrales, las demarcaciones alertadoras, cambios de textura y colores. Los “umbrales” consisten en la instalación de señales verticales acompañadas de cambio de color en el pavimento y se pueden utilizar cuando exista exceso de velocidad al ingresar a una zona urbana o travesías en vías de zonas rurales (CONASET, 2010). En la Figura 7 se muestra un ejemplo de este tipo de dispositivos



Figura 7 Umbral utilizado para reducir
velocidad.

Tomado de: CONASET, 2010

Las medidas de gestión de tránsito se refieren a modificación de prioridades en las intersecciones, sentido de las calles y uso de mini-rotondas en zonas urbanas.

2.5 Consistencia del diseño geométrico de la vía

El concepto de consistencia del diseño geométrico se encuentra relacionado con la coordinación que debe existir entre el alineamiento vertical y el horizontal en una carretera de dos carriles y la expectativa que se tiene sobre la respuesta exitosa del conductor ante los eventos y situaciones a los que se enfrentará a lo largo del trazado de la vía.

La evaluación de la consistencia del diseño geométrico de una carretera es una herramienta que examina o modifica el trazado de una vía en función de la consistencia del diseño con la expectativa del conductor (NCHRP, 2003). En la Figura 8, se muestra un gráfico de análisis de consistencia de velocidades en un tramo de carretera, se observa un perfil de velocidades y las variaciones de la velocidad de operación de cada elemento del trazado, con respecto a un valor de velocidad promedio dado (línea horizontal).

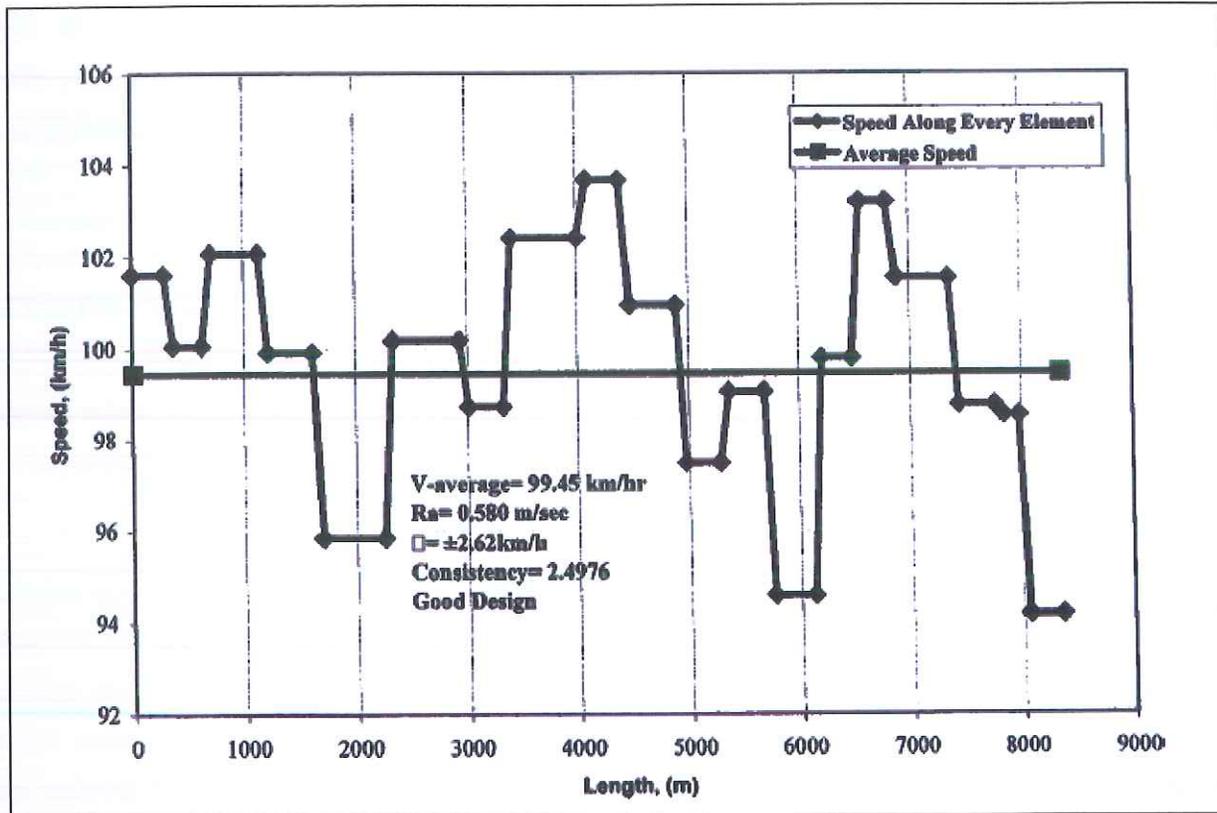


Figura 8 Gráfico de consistencia del diseño geométrico en un trazado de carretera.

Nota: Tomado de Polus (2004)

En países como Estados Unidos, la mayoría de los accidentes de tránsito ocurren en carreteras de dos carriles, los otros tipos de carretera como las autopistas y las carreteras multicarril, ofrecen un mayor nivel de seguridad (Lamm, et al, 1999). Las causas de estos accidentes frecuentemente se asocian a error humano por parte del conductor o a un diseño deficiente. Sin embargo, debido a la gran cantidad de factores que pueden incidir en la ocurrencia de un accidente no es posible diferenciar cuando un diseño es inadecuado, si este cumple o excede los estándares de diseño (NCHRP, 2003).

Una parte del problema está relacionada con la metodología de diseño, dado que los elementos de la carretera deben diseñarse de forma aislada, pero sin dejar de lado que la idea básica de que la carretera es una unidad conformada por varias partes: el conductor, la



geometría y el entorno. A pesar que el diseñador no puede controlar a dos de esos elementos, el conductor y el ambiente, si puede tomarlos en consideración a través de la geometría de la carretera y evitar un divorcio entre ellos que teóricamente aumentaría el potencial de accidente en la vía (NCHRP, 2003).

El concepto de consistencia del diseño geométrico no es una nueva teoría, se formuló alrededor de 1930 cuando se definió que la velocidad de diseño aseguraba la consistencia (Barnett, J. 1936). El concepto de velocidad de diseño ha sido modificado desde entonces, no obstante el criterio original de que un diseño geométrico seguro del camino debe cumplir o exceder los estándares definidos para una velocidad de diseño dada, se mantienen, al igual que los problemas que el concepto de velocidad ha tenido (NCHRP, 2003).

Los resultados de múltiples investigaciones han demostrado la existencia de una relación directa entre la velocidad y la tasa de accidentes en carreteras de dos carriles. Por ejemplo, Graber, et. al (2000) encontró que un incremento en la desviación estándar de velocidades tiene el mismo efecto en la tasa de accidentalidad de carreteras rurales. Por otro lado, Polus, et. al (2004) determinó estadísticamente, en un estudio de 28 carreteras de dos carriles, que al aumentar la consistencia del diseño geométrico, la tasa de accidentes disminuye.

2.6 Velocidad de diseño y de operación

De acuerdo con AASHTO (2011), la velocidad de diseño se define como la velocidad utilizada para diseñar varios de los elementos geométricos de un trazado de carreteras, específicamente las curvas horizontales y verticales, dejando por fuera las tangentes, donde los usuarios pueden alcanzar velocidades mucho mayores. Este valor debe ser coherente con la velocidad de operación esperada, la topografía, el uso del suelo a lo largo del trazado y la clasificación funcional de la carretera. La escogencia cuidadosa del valor de velocidad de diseño debe permitir la obtención de un diseño balanceado que combine seguridad vial, movilidad, eficiencia, economía, estética, además de aspectos sociales, políticos y medio ambientales.

El uso de valores de diseño, por encima del mínimo recomendado, es una práctica recomendable en carreteras de alta velocidad (por encima de 80 km/h) donde es muy poco probable que se sobrepase el valor de la velocidad de diseño, pero en carreteras de baja velocidad (por debajo de 70 km/h), es posible que los usuarios circulen a velocidades de operación mayores que la velocidad de diseño.

Algunos de los elementos del diseño que tienen una relación directa con el valor de la velocidad de diseño son:

- Curvatura
- El peralte o superelevación
- Distancia de visibilidad

Otros parámetros como el ancho de carril, el ancho del espaldón y el tamaño de la zona libre, no están relacionados directamente con la velocidad de diseño, pero sí tienen influencia sobre la velocidad de operación de la vía (AASHTO, 2011).

La escogencia del valor de la velocidad de diseño debe ser consistente con la expectativa del conductor como se mencionó anteriormente, por ejemplo, cuando se establece un límite de velocidad justificado por una razón o condición evidente para el conductor, este reaccionará de forma positiva ante la regulación, si por el contrario el conductor no percibe tal condición en la vía, consecuentemente no estará dispuesto a atender la regulación (AASHTO, 2011).

La velocidad de operación está controlada por señales de tránsito de "velocidad máxima", esta regulación debe estar directamente relacionada con el percentil 85 de la distribución acumulada de velocidades, obtenida a partir de una muestra estadísticamente representativa de vehículos, y contrastada con las condiciones de la vía y su entorno. Si estos límites de velocidad se definen de forma arbitraria es difícil que la regulación de velocidad sea efectiva (AASHTO, 2011).

2.7 Criterios de evaluación de la consistencia del diseño geométrico

El enfoque de los criterios de evaluación de la consistencia del diseño geométrico más utilizados, se centra en la valoración de diferenciales de velocidad, entre la velocidad de diseño y la velocidad de operación entre dos tramos de carretera consecutivos.

De acuerdo con Lamm (1999), quien desarrolló uno de los métodos de consistencia más utilizados, la consistencia local (entre segmentos consecutivos) del diseño geométrico de carreteras de dos carriles, se puede evaluar según el cumplimiento de tres criterios que utilizan como indicador el diferencial entre de la velocidad de diseño (v_d) y la velocidad de operación (v_{85}), estos criterios se muestran en la Cuadro 2. El primer criterio analiza la diferencia entre la velocidad de operación (v_{85}) y la velocidad de diseño (v_d) en un mismo segmento, mientras que el segundo analiza la disminución de velocidad de operación entre una tangente (i) y una curva (i+1) consecutivos. Estos diferenciales de velocidad son los que el conductor en teoría puede asimilar sin violar su expectativa.

Cuadro 2 Criterios de consistencia del diseño geométrico.

Consistencia del diseño geométrico	Criterio 1 (km/h)	Criterio 2 (km/h)
Buena	$ v_{85} - v_d \leq 10$	$ v_{85i} - v_{85(i+1)} \leq 10$
Aceptable	$10 < v_{85} - v_d \leq 20$	$10 < v_{85i} - v_{85(i+1)} \leq 20$
Pobre	$ v_{85} - v_d > 20$	$ v_{85i} - v_{85(i+1)} > 20$

Nota: Tomado de Lamm, (1999).

Existen otros modelos y criterios de consistencia del diseño geométrico, los cuales evalúan el diseño de forma global (en tramos completos), a partir de criterios relacionados con la estabilidad del vehículo, indicadores de alineamiento como radio de curvatura y fatiga del conductor (Ng, 2004) y (Awata et al, 2002).



La evaluación de la consistencia del diseño geométrico se realiza a partir de un perfil de velocidades que se utiliza para detectar las inconsistencias de velocidad a lo largo del alineamiento. Un perfil de velocidades es un gráfico de velocidades de operación contra distancia donde las inconsistencias de diseño se identifican a partir de los criterios enunciados en la Cuadro 2 (FHWA, 2000).

La velocidad de operación se obtiene a partir de un modelo de velocidad calculado a partir del percentil 85 de las velocidades, es un valor internacionalmente aceptado para describir el comportamiento de este parámetro en una carretera de dos carriles. Es una expresión matemática, obtenida a partir de regresión lineal u otros modelos probabilísticos, que busca predecir la velocidad de operación de los vehículos de pasajeros (v_{85}) en función de las características geométricas de la vía en las secciones de tangente y curva (TRB, 2011)

A lo largo del desarrollo del diseño geométrico se han desarrollado diversos modelos de predicción de la velocidad, los cuales evidentemente están asociados a las características de los usuarios y de la red vial del país en que fueron desarrollados (Arguelles, 2013).

En Costa Rica no se ha definido un modelo específico para las condiciones del país, sin embargo, Arguelles (2013) realizó la comparación de once modelos de velocidad de operación de ocho países distintos, con mediciones de campo con radar, en carreteras de dos carriles en Costa Rica. Los resultados obtenidos muestran que el modelo de velocidad de operación que mejor aproxima a las condiciones obtenidas en campo, es el modelo propuesto por Nie et al (2007), donde el porcentaje de diferencia es de un 6%. Por otro lado, también determinó que el modelo de predicción de velocidad utilizado por la Federal Highway Administration (FHWA, 2000) en el programa Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM), que es una herramienta informática desarrollada para evaluar los efectos del diseño geométrico en la seguridad vial y las condiciones de operación en las carreteras, se pueden obtener diferencias en el orden del 14,3% del valor de la velocidad medida en campo. No obstante es importante recordar que los modelos de velocidad, como el de FHWA (2000), no consideran la velocidad de los vehículos pesados como lo hizo Arguelles (2013). Ver Cuadro 3.

Cuadro 3 Modelos de velocidad de operación

Ecuación	Modelo de velocidad de operación	Ecuación
1	FHWA (2000)	$v_{85} = 102,2 - \frac{3077,13}{R}$
2	Nie y Hassal (2007)	$v_{85} = 110,386 - \frac{6856,213}{R}$

Nota: Tomado de Arguelles, (2013).

2.8 Programa IHSDM

La Federal Highway Administration (FHWA) ha creado el programa Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM versión 7.0.0), para evaluar los efectos del diseño geométrico en la seguridad vial y las condiciones de operación en las carreteras. Este es un programa de cómputo libre que realiza la evaluación de la consistencia del diseño geométrico a partir de los criterios de Lamm (1999) y FHWA (2011).

El programa consta de 5 módulos que evalúan diferentes componentes del desempeño de la seguridad vial y el desempeño de la carretera:

- Módulo de análisis de accidentes: realiza la predicción de la cantidad esperada de accidentes y propone medidas de mitigación. Este módulo requiere calibración y validación para su uso en Costa Rica.
- Módulo de consistencia: evalúa la expectativa de velocidad del conductor relativa al diseño geométrico.
- Módulo de conductor/vehículo: realiza una evaluación del conductor y cómo operaría determinado tipo vehículo en un alineamiento. Este módulo requiere calibración y validación para su uso en Costa Rica.
- Módulos de análisis de tráfico: estima las condiciones de operación del diseño bajo los volúmenes de tráfico del proyecto.



- Módulo de revisión de normativa: evalúa la conformidad de cada elemento con la normativa AASTHO.

La metodología del IHSDM solo considera la evaluación de carreteras de dos carriles dado que este tipo de vía representa alrededor de las dos terceras partes de las carreteras bajo la administración de FHWA. El programa IHSDM puede ser descargado de forma gratuita de la página electrónica www.ihsdm.org.



3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE SEGURIDAD VIAL

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de seguridad vial del Proyecto Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. Este proyecto constituye una extensión de la Ruta Nacional N° 4.

3.1 Revisión de normativa de diseño

La normativa de referencia aplicada al proyecto geométrico corresponde a la versión del año 1994 del Manual de Diseño Geométrico de AASTHO ("A Policy for de Geometric Design of Highways and Streets") y al Manual de Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales del año 2004 (SIECA, 2004). Según la normativa de referencia (SIECA, 2004), el tipo de carretera es Troncal Rural, lo cual equivale a Sistema Arterial Rural Menor (AMR), según el Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales (SIECA, 2011). Este tipo de vía se caracteriza por:

- Tránsito Promedio Diario (TPD): 3.000 – 10.000 vehículos
- Número de carriles: 2

Al comparar la información anterior con la disponible para el proyecto:

- TPD: 5.148 vehículos (en el 2007)
- Número de carriles: 2

Según SIECA (2011), el sistema arterial rural menor (AMR), en conjunto con el sistema arterial rural principal, forma una red con las siguientes características de servicio:

- Conexión de ciudades y otros generadores de tránsito que son capaces de atraer viajes sobre distancias largas.
- Servicio departamental y municipal integrado.
- Espaciamiento interino acorde con la densidad de población, de modo que todas las zonas desarrolladas en los departamentos estén a distancias razonables de las carreteras arteriales.

- Movimientos en corredores acordes a los puntos anteriores con longitudes de viaje y densidad de viaje mayores que las predominantemente servidas por los sistemas rurales colector o local.

Por tanto, las arterias menores constituyen vías, cuyo diseño debería esperarse que provea velocidades de viaje relativamente altas, y mínima interferencia de los movimientos directos.

3.2 Alineamiento horizontal

La información disponible en los planos del proyecto sobre el alineamiento horizontal es la siguiente:

- Velocidad de diseño indicada, $v_d = 100$ km/h
- Peralte máximo indicado, $e = 10\%$

El factor de fricción lateral, f , no se indica en planos. Se establece mediante la Figura 9 del Manual de Diseño Geométrico (AASHTO, 2004) que el valor podría ser de $f = 0,12$.

Con base a la información anterior, y la ecuación 3 se determina que el radio mínimo es de 358 metros.

$$R_{min} = \frac{v^2}{127 * (e_{m\acute{a}x} + f_{m\acute{a}x})} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

v : velocidad de diseño

$e_{m\acute{a}x}$: peralte máximo

$f_{m\acute{a}x}$: factor de fricción máximo

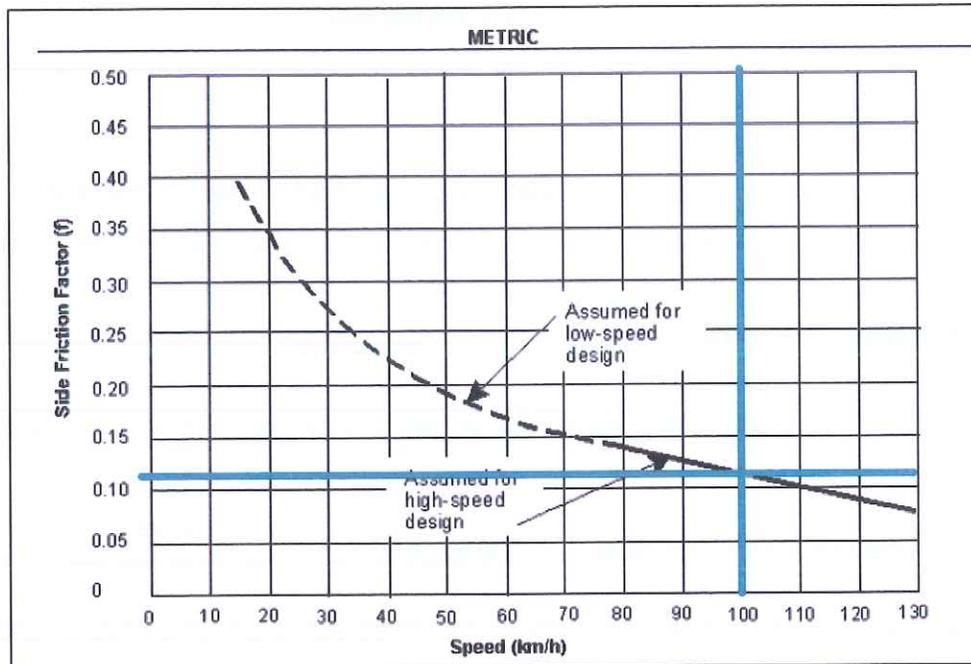


Figura 9 factor de fricción lateral
Nota: Tomada de AASHTO (2004)

Las curvas de menor radio en planos fueron las número 15, 16, 17 y 18, de 420 metros de radio cada una por lo que se concluye que el alineamiento horizontal satisface el criterio de radio mínimo. Ver Cuadro 4.

Cuadro 4 Curvas horizontales de menor radio.

	Ubicación según su PI	Radio (m)
15	9+076,320	420
16	10+358,199	420
17	11+483,192	420
18	12+281,169	420

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

El Manual Centroamericano de Diseño Geométrico de Carreteras Regionales (SIECA, 2011) establece el criterio de que la longitud máxima de recta no debe exceder el valor de 20 veces la velocidad de diseño, esto permite evitar la monotonía en la carretera y que disminuya la concentración del conductor. También disminuye las oportunidades de exceder el límite de velocidad. Como la velocidad de diseño es de 100 km/h, la longitud máxima de recta recomendada para este proyecto sería de 2.000 metros.

Las curvas de radio amplio (mayores a $R = 1.000$ m) no son útiles para terminar con este tipo de monotonía: no exigen una gran concentración por parte del conductor y no lo obligan a disminuir su velocidad. Esta condición se da en las estaciones 0+000 y 4+800, 13+500 y 16+900, y 17+200 y 27+200.

3.3 Alineamiento vertical

La información disponible en los planos del proyecto sobre las especificaciones del alineamiento horizontal es la siguiente:

$$V_{DIS} = 100 \text{ km/h}$$

Terreno: Ondulado – Plano (Lomerío)

La pendiente máxima sería $e_{max} = 4\%$

Cuadro 5 Pendiente máxima para carreteras arteriales

TIPO DE TERRENO	Máxima Pendiente (%) para la Velocidad de Diseño Especificada, KPH					
	60	70	80	90	100	110
Plano	5	5	4	4	3	3
Lomerío	6	6	5	5	4	4
Montañoso	8	7	7	6	6	5

Nota: Tomado de AASHTO, (2004).

En el Cuadro 6 se muestran las curvas verticales que exceden el 4% de pendiente máxima indicado por la norma. Sin embargo, en la memoria de cálculo del diseño geométrico el diseñador declara que la pendiente a utilizar es de un 6%. Esta decisión puede afectar la visibilidad disponible en curvas verticales e intersecciones, así como la velocidad de operación de los vehículos pesados.

Cuadro 6 Curvas verticales que exceden la pendiente máxima

Desde		Hasta		Pendiente e (%)
PIV	Estación	PIV	Estación	
1	0+001,654	2	0+294,937	4,701
8	2+419,505	9	2+721,970	6,000
28	10+406,600	29	10+703,811	-4,826
29	10+703,811	30	11+134,237	5,411
39	16+299,859	40	16+578,924	4,651
68	25+762,530	69	26+143,000	-4,997

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

De acuerdo con AASHTO 2011 (Sección 3.5.2 General Design Controls), las curvas horizontales de radios pequeños se deberán evitar en la parte más alta de una cresta, o en la parte más baja de un columpio. La curvatura en el alineamiento vertical como en el horizontal deberá ser lo más reducida posible para asegurar la visibilidad de ambas carreteras para asegurar un frenado adecuado. De igual forma, el PI y el PIV deben estar alejados de forma tal que no interfieran con la visibilidad del usuario.

Se presentan a continuación aquellas curvas horizontales y verticales que podrían presentar inconvenientes debido a su combinación, por lo que un análisis más profundo y detallado es recomendado en estos tramos.

Cuadro 7 Combinación de curvas horizontales y verticales con riesgo de visibilidad limitada

Identificación		Ubicación		Ángulo de deflexión (Δ)	Radio	Pendientes	
						g1	g2
PI	PIV	PI	PIV	(m)	(m)	%	%
6	14	4+970,075	4+936,600	33,475	700	2,081	-1,831
7	15	5+404,240	5+396,600	7,64	700	-1,831	1,875
15	24	9+076,320	9+076,082	0,238	420	1,698	-1,200
19	32	13+097,799	13+022,380	75,419	800	2,908	-0,700
22	41	17+106,199	17+007,200	98,999	600	1,825	-1,358
35	68	25+807,874	25+762,530	45,344	1000	2,227	-4,997

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

3.4 Distancia de Visibilidad disponible y requerida

Las especificaciones del proyecto indican que la distancia de visibilidad requerida del proyecto es de 185 metros para una velocidad de diseño de 100 km/h. La práctica internacional del diseño geométrico dice esta distancia debe ser, como mínimo, igual a la distancia de frenado (AASHTO, 2004).

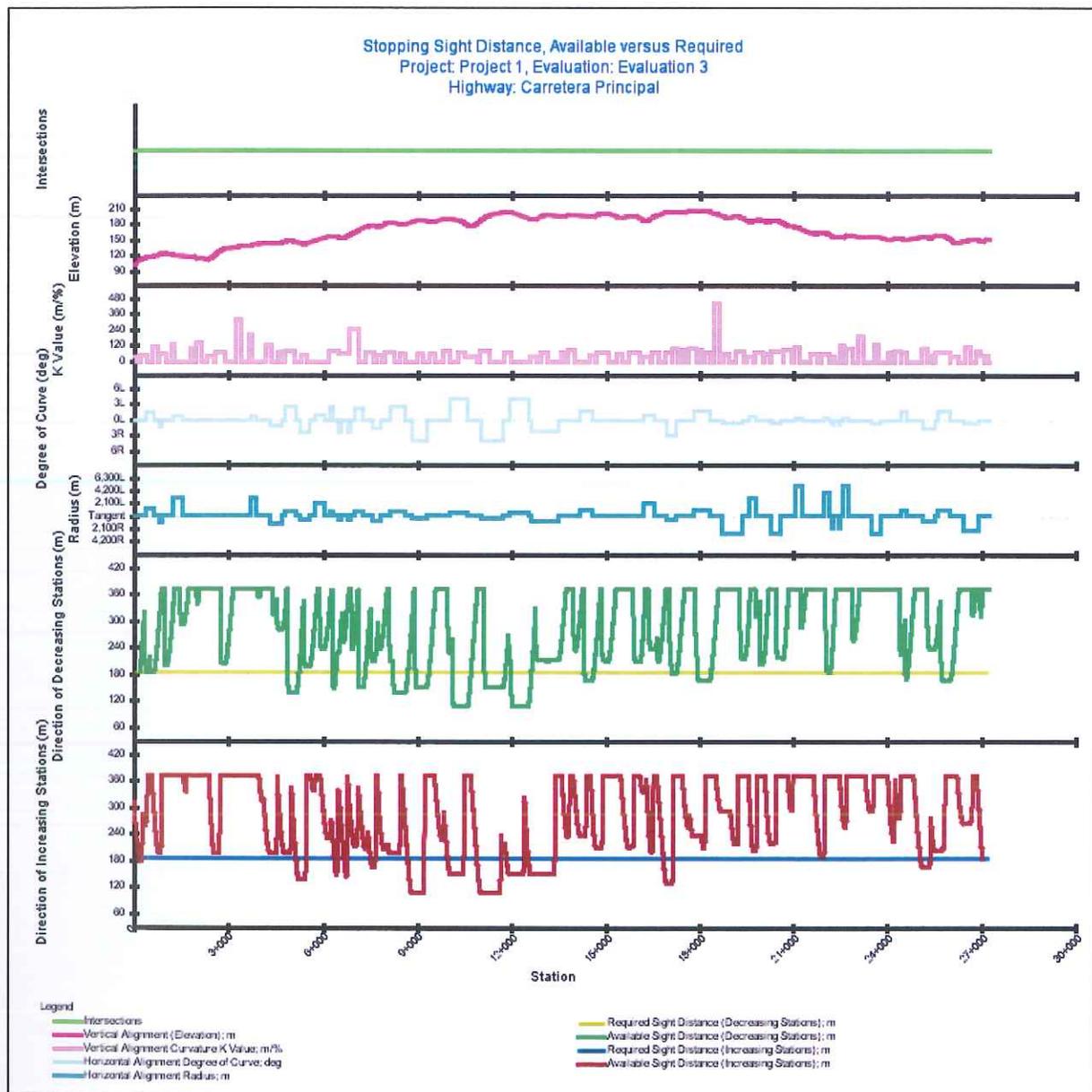
El análisis del diseño geométrico con la herramienta IHSDM arrojó los resultados mostrados en el Gráfico 1. En la parte inferior del gráfico se muestra la distancia de visibilidad correspondiente al sentido creciente (Chilamate-Vuelta de Kooper), indicado en color verde y al sentido decreciente (Vuelta de Kooper-Chilamate) indicado en rojo. Las líneas



horizontales de color amarillo y azul representan el valor de distancia de visibilidad requerida, calculadas con la fórmula de AASHTO (2004).

Los valores que se ubican por debajo de las líneas horizontales representan tramos con incumplimientos entre la distancia de visibilidad requerida y la disponible. A estos tramos se debe poner atención al momento de definir las zonas de adelantamiento y reforzar su señalización vial. Los tramos donde se presentan los incumplimientos de distancia de visibilidad corresponden a sectores donde el valor del grado de curvatura de las curvas horizontales o el valor de la curvatura vertical ("K") no cumplen con el valor mínimo de la normativa, o se encuentran muy cercanos entre sí los valores de PI y el PIV, por lo que limitan la visibilidad disponible del conductor. En los Cuadros 9 y 10 se resumen los tramos donde se identificó esta inconsistencia.

Gráfico 1: Distancia de visibilidad disponible y requerida



Cuadro 8 Tramos con incumplimientos de distancia de visibilidad disponible, sentido creciente.

Estación		Visibilidad	
Inicio	Final	Disponibile (m)	Requerida (m)
0+158	0+236	178	185
5+146	5+468	140	185
6+368	6+462	148	185
6+668	6+774	144	185
7+512	7+666	166	185
8+690	9+216	108	185
9+964	10+474	152	185
10+896	11+652	108	185
11+836	12+406	152	185
12+532	13+378	150	185
16+854	17+164	128	185
25+060	25+376	166	185

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

**Cuadro 9 Tramos con incumplimientos de distancia de visibilidad disponible.
sentido decreciente.**

Estación		Visibilidad	
Inicio	Final	Disponible (m)	Requerida (m)
0+378	0+406	184	185
0+528	0+634	184	185
4+878	5+240	140	185
6+306	6+400	148	185
7+114	7+334	150	185
8+214	8+690	140	185
8+920	9+362	152	185
10+108	10+704	108	185
11+126	11+798	152	185
11+982	12+636	108	185
14+326	14+618	166	185
17+124	17+270	182	185
17+940	18+386	166	185
24+586	24+650	170	185
25+734	26+066	166	185

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

Cuadro 10 Tramos con incumplimientos en el valor de la curvatura vertical "K"

Estación		Valor de K		Curva	
Inicio	Final	Según planos (m/%)	Según normativa (m/%)	Tipo	Longitud (m)
0+194.937	0+394.937	51.81	52.00	Cresta	200.00
2+299.505	2+539.505	36.36	45.00	Columpio	240.00
5+316.600	5+476.600	43.17	45.00	Columpio	160.00
7+662.350	7+842.350	43.90	45.00	Columpio	180.00
10+513.815	10+893.815	37.12	45.00	Columpio	380.00
12+581.332	12+781.332	41.30	45.00	Columpio	200.00
16+149.859	16+449.859	35.94	45.00	Columpio	300.00
19+515.595	19+723.595	37.20	45.00	Columpio	208.00
22+196.000	22+336.000	37.55	45.00	Columpio	140.00
26+010.000	26+276.000	40.95	45.00	Columpio	266.00
26+944.000	27+084.000	42.80	45.00	Columpio	140.00
27+138.984	27+228.984	50.39	52.00	Cresta	90.00

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

3.5 Distancia de Visibilidad de adelantamiento

La calidad de los planos de señalización vial del proyecto no permiten hacer una valoración de la calidad de la distancia de visibilidad para adelantamiento, dado que no se puede definir con certeza los puntos de inicio y final de las zonas donde el adelantamiento es permitido. Por lo tanto, no se incluye ese análisis en el contenido de este informe.

3.6 Análisis de consistencia del diseño geométrico

En el Gráfico 2 y el Gráfico 4, se muestran para el sentido Chilamate-Vuelta de Kooper (creciente) y para el sentido contrario (decreciente), los resultados del análisis de consistencia del diseño geométrico generados por el programa IHSDM. Estos resultados fueron obtenidos a partir de la construcción del perfil de velocidades de operación y diseño con la ecuación 1 del Cuadro 3 y compararlos con los criterios de consistencia del Cuadro 2.

En ambos gráficos se observa en la parte inferior el perfil de velocidades (en color verde), más arriba los radios de curva (en color celeste) y el grado de curvatura (en color gris), seguido del valor de curvatura "K" (en color rosado) y el perfil altimétrico del trazado (en color fucsia) y finalmente, en la parte superior se ubican las intersecciones del proyecto, sin embargo los planos del proyecto no contienen información suficiente para poder incluirlas dentro del análisis.

Específicamente, en el perfil de velocidades es posible reconocer los siguientes elementos que acompañan al perfil proyectado de velocidad de operación (v_{85}) mostrada a trazos de color verde, la velocidad de diseño se representa con una línea horizontal a puntos de color verde, la velocidad permitida, según la señalización vial mostrada en planos, se muestra con una línea a trazos de color gris.

Los elementos individuales que incumplen el criterio 1, especificado en el Cuadro 2, se muestran con banderas según el código de colores de ese mismo Cuadro. De igual forma, los tramos que incumplen con el criterio 2, se representan por medio de una línea a trazos con los colores del Cuadro 2.

Gráfico 2 Perfil de velocidades para el sentido creciente

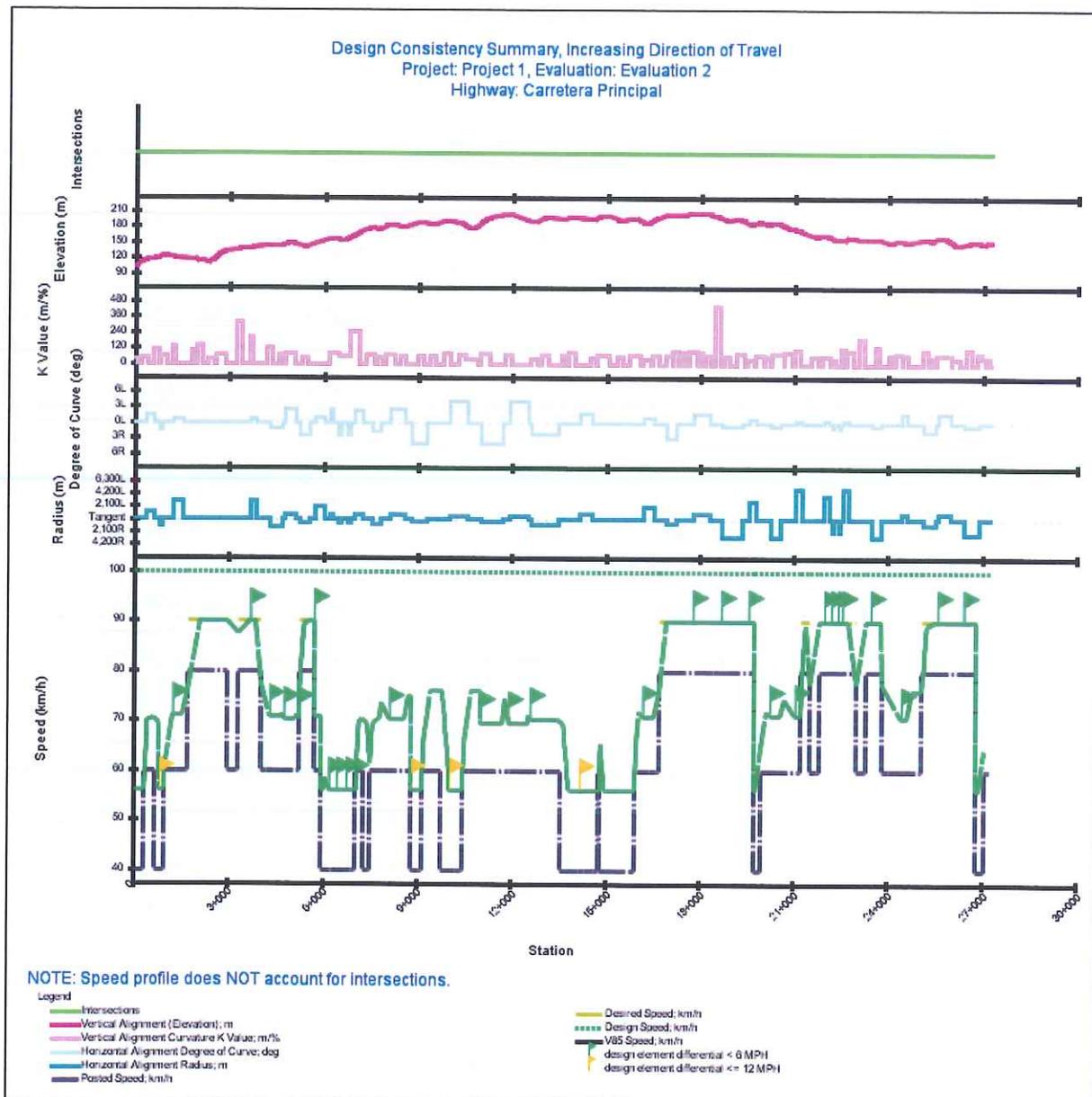
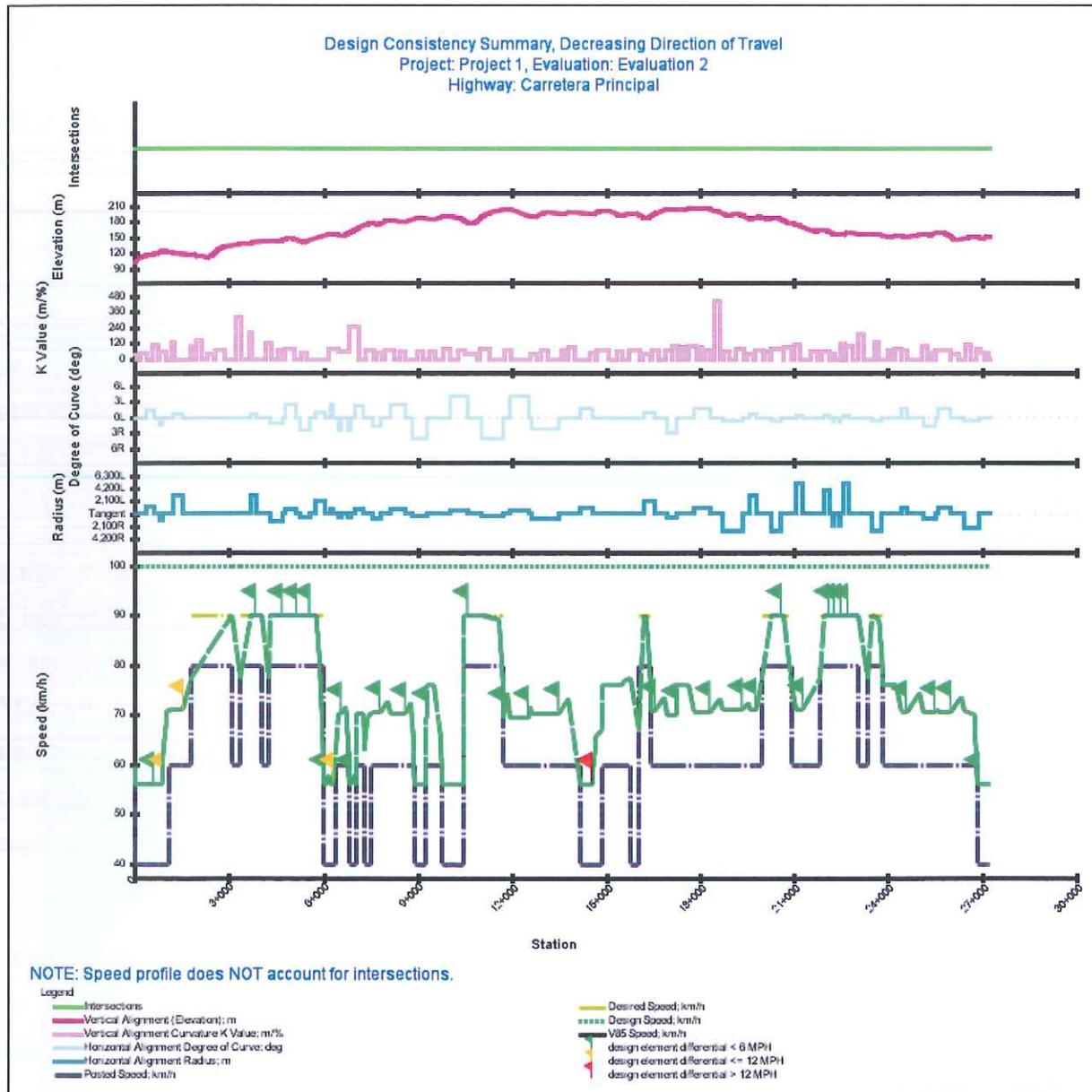


Gráfico 4 Perfil de velocidades en sentido decreciente



En los resultados de la evaluación de consistencia del diseño geométrico con el criterio 1 del Cuadro 2, obtenidos para el sentido creciente, de Chilamate hacia Vuelta de Kooper, (Gráfico 2) se observa que el perfil de velocidad de operación proyectado no supera al valor de la velocidad de diseño. Sin embargo, se observan ocho tramos donde el diferencial de velocidades de operación y diseño se encuentra entre 10 km/h y los 20 km/h, por lo que incumplen con el criterio 1 del Cuadro 2. Estos tramos se pueden clasificar con inconsistencias "aceptables". En el Anexo se adjunta el perfil de velocidades resultante y la ubicación cada tramo.

En el Gráfico 2, están resaltados en color amarillo 4 elementos del alineamiento donde el diferencial de velocidades entre elementos consecutivos (tangente-curva) está entre 10 km/h y 20 km/h, por lo que incumplen con el criterio 2 del Cuadro 2. Estas inconsistencias pueden ser calificadas como "aceptables", según lo definido por Lamm (1999). En el Cuadro 11 se resumen las ubicaciones de estas inconsistencias.

Del perfil de velocidades mostrado en el Gráfico 2 se observa que la velocidad permitida en el trazado de la vía se encuentra, entre 10 km/h y 15 km/h por debajo de la velocidad de operación esperada en la mayor parte del trazado. Este diferencial de velocidades se encuentra dentro del rango de tolerancia de la Ley de Transito y Seguridad Vial (Ley 8677), pero no deja de ser un indicador sobre riesgo potencial de que los límites de velocidad sean excedidos especialmente en las zonas pobladas donde el límite de velocidad indicado es de 40 km/h. Esta posibilidad tendría un impacto en la probabilidad y frecuencia de choques relacionados con exceso de velocidad.

Los resultados de consistencia para el criterio 1 del Cuadro 2, del diseño geométrico para el sentido decreciente, de Vuelta de Kooper hacia Chilamate (Gráfico 4) muestran una condición similar a la del sentido creciente: el perfil de velocidad de operación proyectado nunca llega a superar al valor de la velocidad de diseño del proyecto (100 km/h). Se observan ocho tramos donde el diferencial de velocidades de operación y diseño se encuentra entre 10 km/h y los 20 km/h, que incumplen con el criterio 1 del Cuadro 2. Estos

tramos se pueden clasificar con inconsistencias "aceptables". En el Anexo se adjunta el perfil de velocidades resultante y la ubicación cada tramo en la dirección decreciente.

Cuadro 11 Resumen de resultados de consistencia bajo el criterio 2 para el sentido creciente (Chilamate-Vuelta de Kooper).

Estación de la tangente precedente (i)	Velocidad de la tangente precedente (km/h)	PC de inicio de curva (i+1)	Velocidad en curva (km/h)	Diferencial de velocidad (km/h)	Condición
804.434	70	819.857	56	13	2
1+236.738	71	1+241.237	71	0	1
2+120.171	90	3+702.218	90	0	1
4+050.000	77	4+310.525	71	7	1
4+706.221	71	4+782.399	70	1	1
5+172.808	71	5+238.664	70	1	1
5+563.839	90	5+724.225	90	0	1
6+076.997	58	6+210.224	56	2	1
6+356.611	56	6+460.446	56	0	1
6+621.496	56	6+760.347	56	0	1
6+901.964	56	7+006.363	56	0	1
7+875.476	73	8+117.111	70	3	1
8+726.736	75	8+809.695	56	19	2
9+408.989	76	10+040.192	56	20	2
10+709.779	76	11+015.258	70	7	1
11+783.994	74	11+913.614	70	5	1
12+537.802	71	12+613.460	70	1	1
13+664.396	70	14+196.136	56	13	2
16+082.007	72	16+213.544	71	1	1
17+256.851	90	17+808.781	90	0	1
17+808.781	90	18+709.627	90	0	1
18+709.627	90	19+582.039	90	0	1
20+161.390	72	20+271.055	71	1	1
20+695.789	74	21+067.073	71	3	1
21+820.000	90	21+988.227	90	0	1
21+988.227	90	22+221.224	90	0	1
22+221.224	90	22+425.991	90	0	1
22+425.991	90	22+568.053	90	0	1
23+320.000	90	23+464.846	90	0	1
23+850.000	77	24+456.118	70	7	1
25+506.311	90	25+602.444	90	0	1
25+602.444	90	26+427.117	90	0	1

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

En el Gráfico 4, están resaltados 4 elementos del alineamiento que presentan inconsistencias de velocidad. De estos elementos, 3 de ellos están resaltados con bandera de color amarillo, donde el diferencial de velocidades entre elementos consecutivos (tangente-curva) está entre 10 km/h y 20km/h, por lo que incumplen con el criterio 2 del Cuadro 2 y uno de los elementos esta resaltado con bandera de color rojo donde el diferencial de velocidades entre elementos consecutivos (tangente-curva) es mayor a 20km/h. Estas inconsistencias según Lamm (1999), pueden ser calificadas como "aceptable" y "pobre" respectivamente. En el Cuadro 12 se resumen las ubicaciones de estas inconsistencias.

La inconsistencia localizada en la tangente ubicada en la estación 15+000 y la curva de la estación 14+560, es la que requiere de mayor atención dado que es la más crítica de todas según el criterio de evaluación utilizado. La estrategia de mitigación debe orientarse a equiparar las velocidades entre ambos elementos, reforzar la señalización vial e implementar otras medidas tendientes a disminuir la velocidad en la tangente.

El perfil de velocidades del Gráfico 4 muestra que la velocidad permitida en el trazado de la vía se encuentra, entre 10 km/h y 15 km/h por debajo de la velocidad de operación esperada en la mayor parte del trazado. Esta condición, al igual que la evidenciada en el sentido contrario de circulación, tendría un impacto en la probabilidad y frecuencia de choques relacionados con exceso de velocidad.

3.7 Intersecciones

La información contenida en los planos del proyecto no incluye un diseño detallado de las intersecciones, lo que no permite realizar un análisis más preciso sobre las condiciones de seguridad vial que se podrían presentar.

3.8 Facilidades para peatones y ciclistas.

La información contenida en los planos del proyecto no incluye diseños relacionados con facilidades para peatones y ciclistas.

Las secciones transversales del proyecto no muestran la existencia de aceras en el proyecto, a excepción de los tramos a construir en bahías para autobús, puentes vehiculares y algunos tramos aislados, sin que se pueda evidenciar que exista conectividad con las comunidades cercanas donde sea probable la existencia de flujos de peatones.

Una situación similar ocurre con las facilidades para ciclistas, en los planos no se observa la existencia de ciclovías o ciclorutas en el proyecto, lo cual contrasta con la condición observada en las vías aledañas al proyecto y en los tramos existentes de la Ruta 4, donde es frecuente el uso de la bicicleta como medio de transporte.

Cuadro 12 Resumen de resultados de consistencia bajo el criterio 2 para el sentido decreciente (Vuelta de Kooper- Chilamate)

Estación de la tangente precedente (i)	Velocidad de la tangente precedente (km/h)	PC de inicio de curva (i+1)	Velocidad en curva (km/h)	Diferencial de velocidad (km/h)	Condición
27+232.389	56	26+908.101	56	0	1
26+355.481	74	26+007.666	70	3	1
25+583.957	71	25+506.311	70	1	1
25+016.469	74	24+592.651	70	4	1
23+050.000	90	22+733.393	90	0	1
22+733.393	90	22+497.565	90	0	1
22+497.565	90	22+289.503	90	0	1
22+289.503	90	22+125.566	90	0	1
21+850.000	77	21+285.195	71	6	1
20+653.899	90	20+604.894	90	0	1
19+980.000	77	19+787.982	71	6	1
19+540.469	73	19+365.873	71	2	1
18+646.274	73	18+328.015	70	3	1
17+623.919	76	17+250.634	70	6	1
16+865.211	73	16+576.176	71	3	1
15+800.000	77	14+560.523	56	21	3
13+783.790	73	13+484.497	70	3	1
12+575.709	72	12+517.493	70	2	1
11+849.915	74	11+720.295	70	5	1
11+015.258	90	10+584.569	90	0	1
9+483.939	76	9+284.824	70	7	1
8+770.838	73	8+598.309	70	2	1
8+049.046	73	7+796.527	70	2	1
6+970.218	58	6+869.702	56	2	1
6+697.293	72	6+558.618	70	2	1
6+558.618	70	6+308.395	56	14	2
6+175.390	58	6+029.089	56	2	1
5+724.225	90	5+563.839	90	0	1
5+563.839	90	5+149.127	90	0	1
5+149.127	90	4+692.083	90	0	1
4+050.000	90	3+856.572	90	0	1
3+075.000	90	1+557.429	71	19	2
1+036.277	71	888.370	56	15	2
0+779.631	56	615.081	56	0	1

Nota: Análisis de acuerdo a los planos de proyecto.

4. CONCLUSIONES

Los planos del proyecto contemplan elementos asociados con el componente de seguridad vial que deben poseer los proyectos de construcción de obra nueva; sin embargo, deben revisarse la cantidad, ubicación y extensión de facilidades peatonales en el proyecto como por ejemplo las aceras en los alrededores de poblados y caseríos y su conectividad con el origen y destinos de los viajes a pie más frecuentes.

En las visitas realizadas al proyecto y a sus vías aledañas se pudo observar el uso frecuente de la bicicleta como medio de transporte. En los planos del proyecto no se contempla la construcción de infraestructura para los ciclistas, por lo que deben realizarse estudios para determinar la demanda de este modo de transporte y proponer facilidades para su movilidad, de acuerdo a las necesidades que se identifiquen.

El diseño geométrico mostró una buena consistencia con respecto a la expectativa del conductor, solo en un caso se obtuvo un tramo de consistencia local deficiente.

La inconsistencia localizada en la tangente ubicada en la estación 15+000 y la curva de la estación 14+560, es la requiere de mayor atención dado que es la más crítica de todas, según el criterio de evaluación utilizado. La estrategia de mitigación debe orientarse a equiparar las velocidades entre ambos elementos, ya sea por medio de la modificación de su geometría, reforzamiento de la señalización vial e implementación de otras medidas de tráfico calmado tendientes a disminuir la velocidad en la tangente.

La verificación del cumplimiento de normativa de diseño geométrico se considera aceptable. El principal incumplimiento está asociado con la distancia de visibilidad disponible y la requerida, dado que se determinaron varios tramos con limitaciones en este parámetro que podría afectar negativamente el nivel de seguridad del proyecto.

Existe la posibilidad de que los límites de velocidad indicados por la señalización vial sean excedidos por los usuarios de la vía, como consecuencia de las características de movilidad que le otorga estándar diseño a este tipo de vías. A esta particularidad se le debe prestar



especial atención en aquellos tramos donde la velocidad límite sea de 40 km/h o menos y que el conductor no perciba una justificación de peso para disminuir su velocidad de marcha, dado el condicionamiento que le otorga el entorno rural que rodea este proyecto.

Las características del diseño geométrico de esta carretera no están conformes a los requisitos establecidos por el PNT 2011-2035 para la Red de Alta Capacidad, en cuanto a su cantidad de carriles y velocidad de diseño . El cambio de estándar de una carretera de 100 km/h de velocidad de diseño a una de 120 km/h, obligaría a realizar modificaciones en el alineamiento actual para cumplir con los requisitos geométricos.



5. RECOMENDACIONES

Realizar estudios de movilidad peatonal y de ciclistas para determinar la factibilidad de incorporar facilidades adicionales.

Revisar la ubicación de las zonas de adelantamiento permitido y la señalización vial en aquellos puntos donde la distancia de visibilidad está por debajo del estándar de la vía. Ver Cuadros 7,8 y 9.

Implementar medidas de tránsito calmado en aquellos tramos de la vía donde la velocidad deba restringirse por alguna situación particular de riesgo y que esta no esté claramente definida para el conductor. También debe tomarse en consideración que el alineamiento horizontal de este proyecto es predominantemente plano, por lo que es posible que un cambio abrupto en la velocidad permitida no sea percibido de inmediato por el conductor.

La Administración, por medio del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, debe analizar la vida útil de la cantidad de carriles propuestos en el diseño geométrico de la carretera y sus condiciones de operación a futuro, por medio de un estudio de demanda que considere la jerarquía y funcionalidad de la vía previstas en el Plan Nacional de Transportes 2011-2035 para este proyecto.

6. REFERENCIAS

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004. A Policy on Geometric Design of the Highways and Streets. Cuarta Edición. Washington, D.C.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2011. A Policy on Geometric Design of the Highways and Streets. Sexta Edición. Washington, D.C.
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2005. Roadway lighting Design Guide. Washington, D.C.
- [4] Barnett, J. (1936) "Safe Friction Factors and Superelevation Design." Sixteenth Annual Meeting Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., Proceedings (1936).
- [5] Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET), 2003. Guía para realizar una auditoría de seguridad vial. Recuperado de <http://www.conaset.cl/images/doc/Guia%20Auditoria%20de%20Seguridad.pdf>
- [6] Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET), 2010. Medidas de Tráfico Calmado: Guía de criterios para la aplicación, ubicación, diseño y señalización de medidas para el tráfico calmado. Recuperado de http://www.conaset.cl/portal/portal/default/guia_trafico_10
- [7] Federal Highway Administration (FHWA), 2000. Speed prediction for two-lane Rural Highways. Recuperado de <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/ihsdm/99171/99171.pdf>
- [8] Garber, N. J., and Ehrhart, A. A. (2000). "The effect of speed, flow and geometric characteristics on crash rates for different types of Virginia

- highways.” VTRC 00-R15, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Va.
- [9] Global Road Safety Partnership, 2008. Speed management: a road safety manual for decision-makers and practitioners. Switzerland.
- [10] Hassan, Y. (2004). “Highway Design Consistency: Refining the State of Knowledge and Practice”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1881, pp. 63-71.
- [11] Institute of transportation Engineers (ITE), 1999. The Traffic Safety Toolbox –a primer on traffic safety, Washington, D.C.
- [12] INECO, 2011. Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035. Memorias. MOPT. pp 69.
- [13] Lamm, R. Psarianos, B. Mailaender, T. 1999. Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook. McGraw-Hill (1999).
- [14] LanammeUCR, 2014. Revisión de la estimación del tránsito promedio diario del proyecto, "Construcción de la Ruta Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. Licitación Pública No. 2011LI-000037-32702"
- [15] MOPT, 2011. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. "Construcción de la Ruta Nacional No. 4, Sección Bajos de Chilamate-Vuelta de Kooper. Licitación Pública No. 2011 LI-000037-32702"
- [16] NCHRP, 2003. Geometric Design Consistency on High-Speed Rural Two-Lane Roadways, Report 502.
- [17] Ng, J. C. W. and Sayed, T. (2004). “Effect of Geometric Design Consistency on Road Safety”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 218.
- [18] Nie, B., and Y. Hassan. Modeling Driver Speed Behavior on Horizontal Curves of Different Road Classifications. Presented at 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.
- [19] Organización Mundial de la Salud (OMS), 2013. Informe sobre la situación mundial de la Seguridad Vial 2013, Washington, D.C.

- [20] Organización Panamericana de la Salud (OPS), 2009. Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas, Washington, D.C.
- [21] Polus, A. Mattar-Habib, C. (2004). New Consistency Model for Rural Highways and its Relationship to Safety. Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers, 2004.
- [22] Rosén, E. y Sander, U., 2009. Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. Suecia.
- [23] Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), 2000. Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito.
- [24] Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), 2001. Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales.
- [25] Transportation Association of Canada (TAC), 2004. The Canadian Guide to In-service Road Safety Reviews.
- [26] Transportation Research Board. (2011). Modeling Operating Speed. Washington: Transportation Research Board.
- [27] Transportation Research Board. (2010). Highway Capacity Manual 2010.

ANEXO

Cuadro A.1 Perfil de velocidades (Sentido Chilamate-Vuelta de Kooper)

Estación	Tipo de segmento	V85 (km/h)	Estación	Tipo de segmento	V85 (km/h)	Estación	Tipo de segmento	V85 (km/h)
2+120.171	Tangente	90	21+282.281	Curva	79	21+988.227	Curva	90
2+950.000	Tangente	90	21+304.550	Tangente	81	22+125.566	Tangente	90
3+702.218	Curva	90	21+327.480	Tangente	84	22+221.224	Curva	90
3+856.572	Tangente	90	21+351.000	Tangente	86	22+289.503	Tangente	90
4+050.000	Tangente	77	21+375.045	Tangente	87	22+425.991	Curva	90
5+263.611	Curva	76	21+399.558	Tangente	89	22+497.565	Tangente	90
5+285.140	Curva	79	21+540.000	Tangente	77	22+568.053	Curva	90
5+307.409	Curva	81	17+808.781	Curva	90	22+733.393	Tangente	90
5+330.339	Curva	84	18+328.015	Tangente	90	22+990.000	Tangente	77
5+353.858	Curva	86	18+709.627	Curva	90	23+464.846	Curva	90
5+377.903	Curva	87	19+365.873	Tangente	90	23+793.033	Tangente	90
5+402.417	Curva	89	19+582.039	Curva	90	23+850.000	Tangente	77
5+563.839	Tangente	90	19+779.999	Curva	90	25+129.373	Curva	79
5+724.225	Curva	90	21+260.753	Curva	76	25+151.642	Curva	81
5+729.999	Curva	90	17+381.851	Tangente	90	25+174.572	Curva	84
16+956.851	Curva	90	17+406.851	Tangente	90	25+198.092	Curva	86
16+981.851	Curva	90	17+431.851	Tangente	90	25+222.137	Curva	87
17+006.851	Curva	90	17+456.851	Tangente	90	25+246.650	Curva	89
17+031.851	Curva	90	17+481.851	Tangente	90	25+506.311	Tangente	90
17+056.851	Curva	90	17+506.851	Tangente	90	25+602.444	Curva	90
17+081.851	Curva	90	17+531.851	Tangente	90	26+007.666	Tangente	90
17+106.851	Curva	90	17+556.851	Tangente	90	26+427.117	Curva	90
17+131.851	Curva	90	17+581.851	Tangente	90	26+819.999	Curva	90
17+156.851	Curva	90	17+606.851	Tangente	90			
17+181.851	Curva	90	17+631.851	Tangente	90			
17+206.851	Curva	90	17+656.851	Tangente	90			
17+231.851	Curva	90	17+681.851	Tangente	90			
17+256.851	Tangente	90	17+706.851	Tangente	90			
17+281.851	Tangente	90	17+731.851	Tangente	90			
17+306.851	Tangente	90	17+756.851	Tangente	90			
17+331.851	Tangente	90	17+781.851	Tangente	90			
17+356.851	Tangente	90	17+806.851	Tangente	90			

Cuadro A.2 Perfil de velocidades Sentido Vuelta de Kooper-Chilamate

Estación	Tipo de segmento	V85 (km/h)	Estación	Tipo de segmento	V85 (km/h)
23+773.463	Curva	84	11+639.098	Curva	84
23+749.943	Curva	86	11+615.579	Curva	86
23+725.899	Curva	87	11+591.534	Curva	87
23+701.385	Curva	89	11+567.020	Curva	89
23+464.846	Tangente	90	11+015.258	Tangente	90
23+350.000	Tangente	77	10+584.569	Curva	90
22+733.393	Curva	90	10+450.001	Curva	90
22+568.053	Tangente	90	5+996.815	Curva	56
22+497.565	Curva	90	5+980.542	Curva	61
22+425.991	Tangente	90	5+962.961	Curva	66
22+289.503	Curva	90	5+944.213	Curva	69
22+221.224	Tangente	90	5+924.423	Curva	73
22+125.566	Curva	90	5+903.706	Curva	76
21+988.227	Tangente	90	5+882.160	Curva	79
21+850.000	Tangente	77	5+859.875	Curva	81
20+653.899	Tangente	90	5+836.931	Curva	84
20+604.894	Curva	90	5+813.400	Curva	86
20+271.055	Tangente	90	5+789.344	Curva	87
19+980.000	Tangente	77	5+764.820	Curva	89
16+419.107	Curva	76	5+724.225	Tangente	90
16+397.578	Curva	79	5+563.839	Curva	90
16+375.309	Curva	81	5+238.664	Tangente	90
16+352.379	Curva	84	5+149.127	Curva	90
16+328.860	Curva	86	4+782.399	Tangente	90
16+304.815	Curva	87	4+692.083	Curva	90
16+280.301	Curva	89	4+310.525	Tangente	90
16+213.544	Tangente	90	4+250.000	Tangente	77
16+050.000	Tangente	67	3+856.572	Curva	90
11+705.825	Curva	76	3+702.218	Tangente	90
11+684.297	Curva	79	3+375.000	Tangente	77
11+662.028	Curva	81	1+800.000	Tangente	77