

## **Seguridad Vial - T 059**

### **CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO: VELOCIDAD, ACELERACIÓN, VISIBILIDAD Y CONFIABILIDAD**

**Dr. Ing. Tomas ECHAVEGUREN \***  
**Dr. Ing. Aníbal L. ALTAMIRA \*\***  
**Dr. Ing. Sergio VARGAS - TEJEDA \*\*\***  
**Dr. (c) Ing. Dalila RIVEROS \*\*\*\***

(\*) Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería. Concepción, CHILE.

(\*\*) Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña – Facultad de Ingeniería  
– Universidad Nacional de San Juan. Pcia. de San Juan, ARGENTINA.

(\*\*\*) Universidad del Bio Bio, Facultad de Ingeniería. Concepción, CHILE.

(\*\*\*\*) Universidad Diego Portales, Facultad de Ingeniería. Santiago, CHILE.

ARGENTINA / CHILE

**CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO GEOMÉTRICO:  
VELOCIDAD, FRICCIÓN, VISIBILIDAD Y CRITERIOS AGREGADOS.**

**Dr. Ing. Tomás ECHAVEGUREN (Autor de Correspondencia).**

Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería.

Concepción, Chile.

**Dr. Ing. Aníbal ALTAMIRA.**

Universidad Nacional de San Juan, Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña

Capital, San Juan, Argentina

**Dr. Ing. Sergio VARGAS – TEJEDA.**

Universidad del Bío Bío, Facultad de Ingeniería.

Concepción, Chile.

**Dra. ( c ) Ing. Dalila RIVEROS.**

Universidad Diego Portales, Facultad de Ingeniería.

Santiago, Chile

## RESUMEN

La filosofía del diseño geométrico ha evolucionado rápidamente en los últimos 30 años. El surgimiento de enfoques tales como consistencia en el diseño, *forgiving design*, y diseño sensitivo al contexto, han permitido ampliar la visión cinemática – mecanicista del diseño incorporando aspectos de costos de los usuarios, comportamiento del conductor, seguridad vial e impactos ambientales y sociales.

El enfoque de consistencia en el diseño, permite incluir el comportamiento del conductor a través del estudio de la velocidad de operación y aceleración de operación, visibilidad disponible y provista bajo el concepto probabilístico del riesgo. Existen diversos criterios de consistencia asociados a estas variables tanto para elementos simples del trazado geométrico como para elementos compuestos. Sin embargo, el cómo integrar estos elementos de ingeniería en un solo cuerpo conceptual es aún una tarea pendiente.

En este artículo, se propone una conceptualización de la consistencia del diseño basado en el concepto de expectativas del conductor, indicadores y criterios de consistencia. Se revisan los criterios tradicionales de consistencia para elementos simples, compuestos y de estabilidad dinámica a los cuales se agregan criterios recientemente desarrollados en la literatura, como son los criterios para aproximación a curvas horizontales, para curvas verticales y enfoques agregados.

Se discute en cada caso sus ventajas y limitaciones, para converger finalmente en una discusión acerca de las consideraciones y limitaciones que se deben enfrentar para la implementación del análisis de consistencia en el diseño geométrico.

**Palabras Clave:** Diseño Geométrico, Consistencia, Velocidad, Visibilidad.

## INTRODUCCION

Una de las principales interrogantes de los diseñadores y de las agencias viales es qué tan seguro es un camino. Una respuesta habitual es: si el diseño geométrico está acorde con las normas de diseño entonces el camino es seguro. Sin embargo, a pesar de eso igualmente ocurren accidentes, y una explicación común es atribuirlos a una falla humana. No obstante, ambas afirmaciones se fundamentan en principios no del todo ciertos.

En efecto, las normativas de diseño se fundamentan en modelos simplificados de la realidad en donde se infiere un modelo hipotético de comportamiento del conductor. Por otro lado, el conductor es un operador de una máquina a través de la cual percibe el entorno y toma decisiones a cada instante en función de la información que recibe. Por tanto, si la información tiene mucho ruido o mensajes poco útiles, el conductor puede llegar a tomar decisiones incorrectas que desembocan en accidentes. Se debe notar entonces que el accidente es la respuesta de una cadena causal compleja de sucesos.

Un tercer aspecto a tener en cuenta es que los conductores no reaccionan de la misma manera ante los estímulos que el ambiente de conducción les entrega, aumentando progresivamente su tolerancia al riesgo. La consecuencia directa es que los conductores adaptan continuamente su comportamiento, tratando de lograr una condición de equilibrio homeostático (Wilde, 1998).

El presente trabajo, tiene por objetivo el discutir elementos técnicos desde la perspectiva del análisis de consistencia que permiten avanzar en el tratamiento de las falencias de los métodos de diseño discutidas en el párrafo anterior. Para ello se realiza una breve discusión de los enfoques de diseño y su evolución en el tiempo, para luego discutir el concepto y enfoques del análisis de consistencia. Acto seguido, se discuten criterios e indicadores de consistencia, incluyendo aquellos tradicionalmente desarrollados hasta la década del 90 y los nuevos aportes de diversos investigadores. Se logra así abarcar 30 años de investigación en la disciplina.

## ENFOQUES DE DISEÑO DE CAMINOS Y CARRETERAS

Para abordar la seguridad en el diseño, se han formulado a lo largo del tiempo diversos enfoques de diseño. Desde complejas relaciones entre factores humanos y la experiencia de conducción hasta los enfoques tradicionales que consideran el conjunto conductor – vehículo como una masa puntual que se desplaza a lo largo de una cierta trayectoria. Este último enfoque prevalece en la mayoría de las instrucciones de diseño del mundo. Las diversas filosofías de diseño se pueden clasificar, de acuerdo a Echaveguren y Sáez (2001) en:

- Enfoque de diseño Tradicional, basado en el concepto de velocidad de diseño de Barnett (1940),
- Enfoque de Diseño Neo Tradicional, basado en el estudio de homogeneidad geométrica del trazado.
- Diseño que perdona o diseño indulgente (Forgiving design), basado en los conceptos de Powers et al (1995)
- Diseño Consistente basado en las hipótesis de Glennon y Harwood (1978), McLean (1981) y Messer (1980)
- Diseño Sensitivo al contexto, basado en el precepto de adaptación a las condiciones particulares del área de emplazamiento del diseño y en la satisfacción de los usuarios.

El diseño tradicional aplica el supuesto que la velocidad de diseño describe adecuadamente el comportamiento del conductor y que ésta nunca será sobrepasada por la velocidad de operación. Sin embargo, McLean (1981) en Australia, Krammes (1995) en Estados Unidos y Echaveguren y Sáez (2001) en Chile entre otros investigadores, han verificado empíricamente que dicha hipótesis no es cierta en aquellas vías diseñadas con velocidades de diseño inferiores a 90 – 100 Km/h. En tales casos la velocidad de operación medida en terreno ha resultado ser superior a la velocidad de diseño.

El diseño neo-tradicional considera la evaluación de la homogeneidad de la tasa de cambio de curvatura horizontal para verificar la homogeneidad del trazado diseñado aplicando el concepto de velocidad de diseño. En este sentido da un paso adelante respecto del diseño tradicional al incluir reglas que permiten verificar los diseños.

El concepto de diseño que perdona (forgiving design) fue introducido por Powers et al (1995) sobre la base de dicho concepto aplicado en zonas laterales (forgiving roadside design). El concepto reconoce la variabilidad del comportamiento de los conductores y explica que el diseño debe enfocarse en el percentil 85 de los conductores. El diseño acepta que eventualmente el percentil de conductores no cubierto por el diseño sufrirá un accidente de tránsito, pero el diseño debe asegurar el menor daño posible. Kanellaidis (1996) enfatizó la importancia de poner en práctica estos conceptos integrándolos al momento de seleccionar los parámetros absolutos y deseables que se incluirán en las normativas.

El enfoque de diseño sensitivo al contexto refleja según Stamatiadis (2005), la armonía del diseño entre el hombre y la naturaleza, sin dejar de considerar la seguridad, el ambiente, la comunidad, capacidad, movilidad y presupuesto de inversión. Para ello, enfatiza la flexibilidad del diseño y de las normativas, para lograr soluciones adaptativas bajo el marco de la filosofía de soluciones sensibles al contexto impulsada por la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos. Bajo esta perspectiva, el análisis de consistencia del diseño forma parte integrante de esta filosofía.

El enfoque de consistencia en el diseño data de la década del 40. Glennon y Harwood (1978), resaltan conceptos de las normativas AASHTO de 1945, 1954, 1965 y 1973 que enfatizan la necesidad de evitar diseños restringidos, pero sin enunciar explícitamente el término. Glennon y Harwood (1978), postularon que un diseño consistente no debe alterar las capacidades del conductor para guiar y mantener en control el vehículo, por lo cual tiene directa relación con la expectativa del conductor. De este modo centran el problema en buscar la forma más adecuada de estimar la expectativa del conductor.

Con posterioridad al trabajo de Glennon y Harwood, Mclean, Messer, los trabajos de Lamm en Alemania y Estados Unidos en la década del 90, pusieron en primer plano y métodos para evaluar la consistencia de los diseños geométricos. Comenzó así un nuevo paradigma en la ingeniería de carreteras orientado a incorporar conceptos de seguridad vial desde el diseño a través de una mejor comprensión del comportamiento de los conductores.

## **EL ENFOQUE DE CONSISTENCIA DEL DISEÑO**

Existen diversas definiciones del concepto de consistencia del diseño, derivados del propuesto por Glennon y Harwood (1978). Al - Masaeid et al (1995), la definen como la condición bajo la cual la geometría de un camino se encuentra en armonía con las expectativas de los conductores tal que evitan maniobras críticas. Irizarry y Krammes (1998) por su parte, la definen como aquel diseño cuya geometría se encuentra acorde con las expectativas del conductor.

La expectativa del conductor es una apreciación subjetiva del ambiente de conducción que le espera, la cual está basada en la experiencia pasada y en su conocimiento de la red vial. El problema práctico es cómo medir las expectativas del conductor.

McClean (1981), postuló que la principal causa de inconsistencia de los diseños era la diferencia entre la velocidad de diseño y la de operación. Lamm et al (1986) adoptó dicho postulado y construyó en base a sucesivos estudios de campo sus tres criterios de consistencia los cuales en definitiva intentan medir las expectativas de los conductores (Lamm et al 1986, 1987, 1991). Paralelamente, Polus y Dagan (1987) proponían un método de análisis de consistencia basado en la aplicación de análisis estadístico de diferencias de radios de curvatura en segmentos extendidos del trazado.

Messer (1980) por su parte, postuló en concordancia con las ideas de Oglesby (1984) que la consistencia del diseño también estaba relacionada con la tarea de conducción, de modo tal que diseños inconsistentes aumentaban la carga mental del conductor (mental workload), reduciendo la eficiencia de su desempeño y aumentando el riesgo de accidentes. Previamente, McDonald y Ellis (1975), iniciaban intentos de medir el cambio en la carga mental de los conductores en función de los cambios de curvatura en curvas horizontales aisladas.

Desde la década del 80 hasta la actualidad los diversos trabajos de los investigadores han consolidado el análisis de consistencia en cuatro corrientes principales: (a) Enfoque de homogeneidad geométrica, (b) El enfoque de Lamm, (c) el Enfoque de Polus y (d), el enfoque basado en carga mental. Todos ellos, con diversos grados de desarrollo en el estado del arte, intentan establecer mecanismos racionales para estimar las expectativas de los conductores y a la vez definir criterios de evaluación del diseño ante las expectativas modeladas.

### **Enfoque de Homogeneidad Geométrica**

Este enfoque se basa en el objetivo de lograr diseños homogéneos geoméricamente, asumiendo que cambios bruscos de curvatura están asociados a cambios bruscos en la velocidad de diseño y por tanto de la velocidad de operación y por consiguiente a un mayor riesgo de accidentes. Estudios desarrollados en España por Castro et al (2005), mostraron que la hipótesis sobre la cual se basa este enfoque es correcta, especialmente para el caso de cambios bruscos de curvatura.

### **Enfoque de Lamm**

Lamm et al (1986, 1987, 1991), propuso un enfoque basado en el estudio del comportamiento de 2 elementos geoméricos: Curvas aisladas simples y curvas compuestas. Postuló que existía una correlación positiva entre la tasa de cambio de curvatura y la ocurrencia de accidentes. Sobre esa hipótesis, determinó que los conductores seleccionaban una velocidad de operación, en función de la percepción de curvatura, la cual no necesariamente correspondía a la de diseño.

Asimismo, planteó que bajo la perspectiva de la estabilidad dinámica, la diferencia entre la fricción lateral provista por el diseño y la requerida, también era una fuente de inconsistencia. Esto se debe a que si el conductor excede la velocidad de diseño, esto se traduce en una mayor demanda de fricción, la cual puede superar la fricción de diseño hasta llegar al deslizamiento en la curva. Bajo este supuesto, planteó un tercer criterio basado en la estabilidad dinámica en curvas horizontales.

### **Enfoque de Polus**

Polus dirigió su investigación a determinar indicadores de consistencia que involucraran segmentos largos de trazado. Inicialmente desarrolló un método basado en el análisis espectral del trazado el cual correlacionó con calificaciones de consistencia de trazado basado en el juicio experto. (Polus y Dagan, 1987).



Posteriormente, Polus y Mattar-Habib (2004), propusieron un enfoque de análisis de consistencia más amplio, en el cual asumen que en la medida en que exista una mayor varianza punto a punto de la velocidad de operación respecto del valor medio ponderado, y en la medida que la diferencia total en un trazado entre ambas velocidades sea superior, entonces la inconsistencia aumentará exponencialmente en el trazado.

Su enfoque es más general que el de Lamm, pero no incluye conceptos de estabilidad dinámica. Si bien la estabilidad dinámica está correlacionada con la velocidad en trazados con curvatura restringida requiere un análisis específico que incluya además la oferta de fricción en curvas (de Solminihac et al, 2007). No obstante este aspecto puntual, el método de Polus y Mattar-Habib (2004), tiene la ventaja que permite analizar trazados completos, lo cual no es posible mediante la aplicación del enfoque de Lamm.

### **Enfoque de la Carga Mental**

La carga mental en su acepción moderna puede definirse como una medida del esfuerzo que debe aplicar un operador humano mientras desarrolla una cierta tarea, independientemente de la naturaleza de la tarea y de la calidad de ejecución de la misma.

Este enfoque fue tratado inicialmente por McDonald y Ellis (1975). Postularon que el conductor, en tanto que operador de una máquina, está sometido a niveles de esfuerzo que dependen de las condiciones del ambiente de conducción. Basados en la teoría de la carga mental McDonald y Ellis propusieron como indicador el estrés del conductor, expresado como la razón entre el tiempo requerido para ejecutar una serie de tareas de conducción a una velocidad promedio y el tiempo disponible para ejecutar dichas tareas.

Siguiendo esta línea de investigación, Messer (1980), propuso que la carga mental está directamente relacionada con la consistencia, por lo cual vías más inconsistentes presuponen una mayor carga mental y una mayor posibilidad de ejecutar una maniobra errónea.

Hoy en día se sabe que la carga mental está relacionada con el grado de atención, y que existe un rango óptimo de carga mental en donde se maximiza la calidad de la tarea de conducción (Lamm et al, 1999; De Waard, 2002). Por tal motivo los métodos de análisis de

consistencia basados en este enfoque intentan medir la carga mental inducida por diferentes ambientes de conducción (Véase por ejemplo Lamm et al, 1999; Navin y Musa, 2004a y b).

Este enfoque de análisis de consistencia ha prosperado más lentamente que los enfoques anteriormente discutido. Puesto que la carga mental se manifiesta como respuesta corporal al estrés, la mayoría de las investigaciones se han abocado a medir la relación de dichos parámetros como respuesta a diferentes condiciones del ambiente de conducción.

Dichas variables, tales como oclusión visual (Van der Horst, 2004), ritmo cardíaco (Jahn et al, 2005; de Waard et al, 2008), presión mental (Piechulla et al, 2006), tiempo de respuesta (Patten et al, 2006; Makishita y Matsunaga, 2008), entre otras son complejas de medir. Se requieren experimentos controlados y con instrumentación de alta tecnología para llevarlos a cabo. Asimismo, la carga mental está estrechamente relacionada con el comportamiento del conductor, aspecto sobre el cual existen múltiples teorías psico-conductuales aún en desarrollo (Fuller, 2005).

## **INDICADORES DE CONSISTENCIA EN EL DISEÑO**

Los indicadores de consistencia se clasifican de acuerdo a sus variables explicativas. Es así como se pueden identificar indicadores basados en velocidad, fricción, visibilidad y agregados. Una descripción detallada de ellos puede verse en Lamm et al (1999), Echaveguren y Sáez (2001) y Echaveguren y Basualto (2003), Polus y Mattar-Habib (2004) y Lamm et al (2007).

### **Indicadores Basados en Velocidad**

#### *Curvas Horizontales Aisladas*

Los indicadores basados en velocidad fueron propuestos originalmente por Lamm et al (1986) para curvas simples y sucesivas. Determinan la diferencia entre velocidad de operación y la velocidad de diseño en curvas horizontales aisladas y en curvas horizontales compuestas. En el caso de caminos existentes la velocidad de operación usualmente se mide mediante sistemas portátiles o sensores en la mitad de la curva, para posteriormente estimar el percentil 85 de la distribución de velocidades ( $V_{85}$ ) como indicador. En el caso del

diseño, la velocidad de operación se calcula mediante la correlación directa entre la velocidad de percentil 85 y elementos geométricos de la curva, tales como curvatura, peralte, longitud, ancho de pista. La ecuación 1 muestra una expresión generalizada de este tipo de indicadores.

(1)

#### *Curvas Horizontales Sucesivas Opuestas*

Para este tipo de configuraciones Lamm et al (1986) propusieron un indicador de consistencia basado en el diferencia entre las velocidades de operación entre las curvas sucesivas separadas por una tangente común. La ecuación 2 muestra la expresión del indicador.

(2)

La ecuación 2 es válida en el caso en que la tangente común a ambas curvas tenga una longitud tal que impida al conductor acelerar, por lo cual las velocidades de operación están condicionadas por ambas curvas. En el caso contrario, es posible que el conductor acelere hasta alcanzar una velocidad de operación máxima en la tangente común, lo cual lleva a que sea más apropiado utilizar dos indicadores de consistencia, que relacionen la velocidad de operación en cada curva con la velocidad en la tangente máxima por separado.

#### *Curvas Verticales*

Son escasos los estudios que analizan la consistencia en trazados verticales. Pero asimismo, existe una amplia variedad de literatura que estudia la problemática de la visibilidad requerida (DVPreq) y disponible (DVdisp) en trazados verticales con gradientes (pendientes) variables. Existe evidencia empírica que muestra que mientras el conductor cuente con la mayor distancia de visibilidad disponible posible, podrá evaluar de mejor manera lo que ocurre delante de él, y podrá tomar las decisiones adecuadas ante cualquier evento que se presente sobre el trazado.

De acuerdo a esto mientras mayor sea la  $DV_{disp}$  con respecto a la  $DV_{Preq}$  a la velocidad de diseño, mayor seguridad tendrá el conductor para realizar una eventual detención. Si ambas distancias son iguales, el conductor tendrá la visión justa sobre el trazado para detenerse en caso de percibir un objeto en la vía y por consiguiente un margen de seguridad a favor, pero estrecho. Si la  $DV_{disp}$  es menor a la  $DV_{req}$ , el conductor no contará con la visibilidad necesaria para realizar una detención adecuada lo que significa que, de encontrarse un objeto en su recorrido, no podrá detenerse. O bien, se verá en la necesidad de reducir su velocidad hasta ajustar su percepción de igualdad ente ambas distancias de visibilidad. Esto puede llevar en ciertos casos a aumentar la inconsistencia en otros elementos de trazados vecinos.

Sobre la base de estos supuestos, Echaveguren et al (2009) postularon un indicador de consistencia que permite estimar la velocidad de operación a partir de la visibilidad disponible en el trazado, la cual es una característica principalmente geométrica del trazado. El criterio permite estimar la consistencia en cada progresiva mediante un proceso iterativo, en el cual se asume que la visibilidad requerida es igual a la disponible. A partir de dicho supuesto, estiman la velocidad de operación que se incluye en la ecuación 3.

(3)

Esta expresión no es válida en los casos en que la visibilidad es obstruida por ejemplo por camiones lentos en subida. En tales casos, es más adecuado realizar previamente un estudio para incluir pistas ascendentes para camiones.

### **Indicadores de Velocidad de Aproximación**

McFadden y Eleftediarou (2000) y posteriormente Park y Saccomano (2006), elaboraron un indicador que permite estimar el diferencial de velocidad entre la tangente de entrada y una curva horizontal aislada. McFadden y Eleftediarou (2000) construyeron un indicador denominado 85MSR (*Maximum Speed Reduction*) que considera además de la diferencia entre la velocidad de operación en la tangente de aproximación y el punto medio de la curva, la relación entre ellas a través de su covarianza. La ecuación 4 muestra dicho concepto. En ella,  $\mu_i$  son los valores medios de velocidad en el punto medio de cada curva y  $\sigma_i$  sus desviaciones estándares. COV representa la covarianza de las velocidades y  $Z_{0.85}$  es el parámetro de la distribución de probabilidades normal.

(4)

Si se asume independencia de la velocidad entre la tangente de aproximación y el punto medio de la curva, la expresión anterior se traduce en la expresión 5.

(5)

Estas ecuaciones resuelven el problema de subestimación advertido por McFadden y Eleftediarou (2000) al sustraer directamente las velocidades de operación entre elementos sucesivos.

Posteriormente Misaghi y Hassan (2004) propusieron utilizar el indicador  $\Delta_{85}V$ , que representa el percentil 85 de la diferencia en velocidades de operación entre la tangente de aproximación y la mitad de la curva. Misaghi y Hassan estimaron que dicho indicador era 7,6 veces superior a la diferencia de velocidades de operación con lo cual se resuelve el problema de la subestimación.

Tomando como base los estudios de Bavkov (1968) y Steyer et al (2000), Echaveguren y Basualto (2003) propusieron un indicador que incorpora como parámetro la aceleración / deceleración entre la tangente de entrada y el punto medio de la curva. Los autores plantean que no solamente es necesario controlar las diferencias entre velocidades de operación sino que además controlar la aceleración para evitar cambios abruptos de velocidad en distancias muy cortas, lo cual puede llevar al conductor a perder el control del vehículo. La ecuación 6 muestra la expresión propuesta por Echaveguren y Basualto (2003) para el cálculo del diferencial de velocidad de operación.

(6)

En la ecuación,  $\Delta V_{85}$  es la variación de velocidad al ingresar a la curva;  $K_{EV}$  la razón entre la velocidad al entrar a la curva y la velocidad en la tangente de aproximación; y  $a_{EV}$  la tasa de deceleración. La ecuación 6, considera valores reales de aceleración, al contrario de las ecuaciones existentes que utilizan un valor fijo de deceleración de  $0,85 \text{ m/s}^2$  y una ponderación del 50 % para los parámetros de aceleración y velocidad.

## Indicadores Basados en Fricción Lateral

Cuando el conductor excede la velocidad de diseño en curvas horizontales experimenta un aumento cuadrático en la demanda de fricción lateral. Esta demanda puede superar la fricción de diseño y en algunos casos a alcanzar la oferta de fricción del pavimento, particularmente cuando ésta es baja y el grado de curvatura es elevado. En tal circunstancia el riesgo de accidentes aumenta. Para controlar este efecto, Lamm et al (1991) propusieron un indicador para calcular la diferencia entre la fricción demandada y la provista por el diseño, el cual permite verificar el grado de cercanía entre ambas. La expresión 7 muestra tal indicador.

(7)

En esta ecuación, la fricción demandada proviene o bien del uso de la expresión de estabilidad dinámica considerando  $V_{85}$  o bien mediante calibraciones directas fricción velocidad.

## Indicadores Agregados

Al contrario de los indicadores precedentes, los cuales se abocan a elementos aislados del trazado geométrico, los indicadores agregados se abocan a segmentos largos del trazado. De este modo permiten calificar la consistencia de dichos segmentos como un todo. Polus y Mattar-Habib (2004) propusieron un indicador agregado basado en aspectos operacionales y geométricos del trazado, combinado con juicio de expertos acerca de la consistencia de los trazados. El indicador se muestra en la ecuación 8.

(8)

En donde  $R_a$  corresponde a la suma de las áreas en que la velocidad de operación es diferente de la velocidad de operación promedio, dividida por la longitud total del segmento en estudio y  $\sigma$  corresponde a la desviación estándar respecto de la velocidad promedio

ponderada del trazado. De este modo, conociendo el perfil de velocidad de operación, es posible estimar este indicador prescindiendo totalmente de la velocidad de diseño. Para una curva circular simple en que la velocidad promedio corresponde a la velocidad diseño y su diferencia con la velocidad de operación es 10 y 20 km/h, el valor del índice de consistencia de las ecuaciones 8 es 1,4 y 0,4 respectivamente.

## **CRITERIOS DE EVALUACION DE CONSISTENCIA**

Cada uno de los indicadores de consistencia descritos en el capítulo anterior, tienen su correlato con criterios que permiten evaluar el grado de consistencia de los trazados. La totalidad de los criterios de evaluación, están relacionados con accidentes en cada tipo de elemento geométrico del trazado. Por tal motivo es imprescindible contar con una base de datos de accidentes extensa para realizar calibraciones en cada país.

### **Criterios de Lamm**

Lamm propuso para sus tres criterios valores umbrales para calificar la consistencia, en base a estudios de correlación entre tasa de ocurrencia de accidentes, tasa de cambio de curvatura y velocidad de operación y fricción lateral.

Para desarrollar estos criterios Lamm realizó estudios en Nueva York y Alemania (Lamm et al, 2007). A partir de bases de datos de accidentes realizó un análisis de conglomerados para agrupar las distintas clases de tasa de cambio de curvatura (CCR) que otorgaran valores estadísticamente diferentes de tasa media de accidentes. Para ello, primero determinó diversas clases de CCR. Luego para cada clase de CCR calculó la tasa media de accidentes. Posteriormente aplicó sucesivamente un test t de diferencia de medias, modificando los rangos de CCR hasta llegar a valor vecinos de tasa media de accidentes estadísticamente diferentes.

A partir de dicho cálculo definió los siguientes valores críticos de CCR: a)  $CCR > 180$  g/km ( $R > 350$  m) en el cual el riesgo de accidentes resultó el más bajo; b) El rango  $180$  g/km  $< CCR < 360$  g/km ( $175$  m  $< R < 350$  m) en donde la tasa media de accidentes resultó entre 2 y 3 veces mayor al caso de  $CCR > 180$  g/km; c) valores de CCR entre  $360$  g/km y  $550$  g/km, en que la tasa media de accidentes resultó ser cuatro a cinco veces el valor asociado a CCR

inferior a 180 g/km; y d) valores de CCR superiores a 550 g/km, en que la tasa de accidentes resultó ser elevada. Posteriormente Lamm aplicó este mismo criterio usando bases de datos de Alemania, con lo cual obtuvo los criterios que se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1: Criterios de Consistencia de Lamm (Lamm et al, 1986, 1991).**

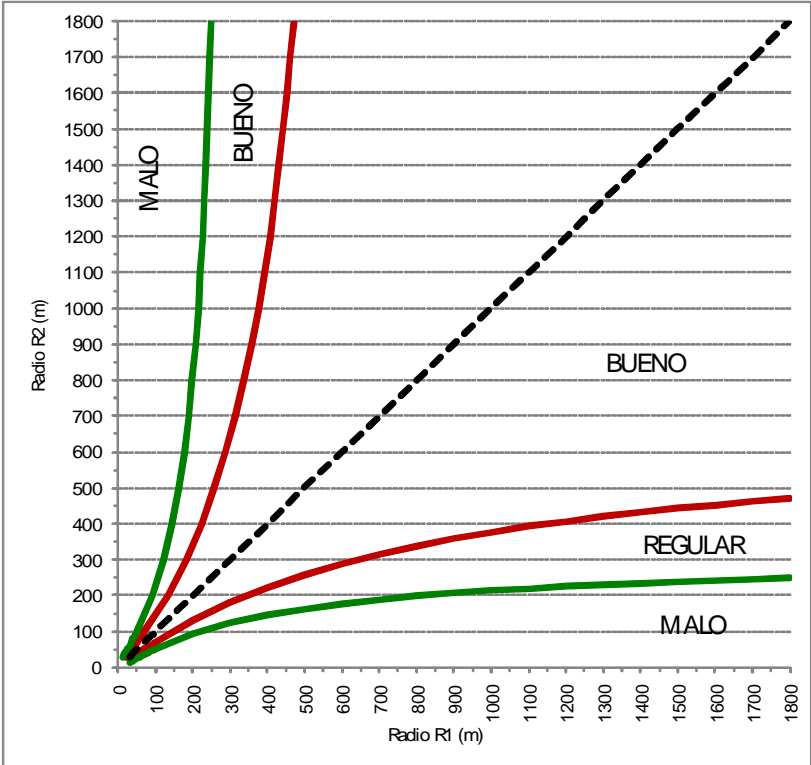
Criterio	Elemento Geométrico	Intervalo de Tasa de Cambio de Curvatura (CCR)	Criterio de Consistencia	Calificación del Diseño
I	Curvas Simples	$CCR_i \leq 180 \text{ g}$	$IC_i \leq 10 \text{ (km/h)}$	Bueno (Good)
		$180 \leq CCR_i \leq 360 \text{ g}$	$10 \leq IC_i \leq 20 \text{ (km/h)}$	Regular (Fair)
		$CCR_i > 360 \text{ g}$	$IC_i > 20 \text{ (km/h)}$	Malo (Poor)
II	Curvas Sucesivas	$ CCR_i - CCR_{i+1}  \leq 180 \text{ g}$	$IC_{II} \leq 10 \text{ (km/h)}$	Bueno (Good)
		$180 \leq  CCR_i - CCR_{i+1}  \leq 360 \text{ g}$	$10 \leq IC_{II} \leq 20 \text{ (km/h)}$	Regular (Fair)
		$ CCR_i - CCR_{i+1}  > 360 \text{ g}$	$IC_{II} > 20 \text{ (km/h)}$	Malo (Poor)
III	Curvas Simples	$CCR_i \leq 180 \text{ g}$	$IC_{III} > + 0,01$	Bueno (Good)
		$180 \leq CCR_i \leq 360 \text{ g}$	$-0,04 < IC_{III} < + 0,01$	Regular (Fair)
		$CCR_i > 360 \text{ g}$	$IC_{III} < - 0,04$	Malo (Poor)

La calificación “Bueno”, corresponde a un diseño consistente, que no requiere cambios sustantivos en el diseño. La calificación “Regular”, corresponde a un diseño que puede tolerar un cierto grado de inconsistencia si se encuentra cercano a la calificación “Bueno”, pero puede requerir rediseños si está cerca de la calificación “Malo” y eventualmente señales de velocidad máxima. Finalmente, la calificación “Malo” requiere un rediseño.

La Figura 1 ilustra el criterio de consistencia entre elementos sucesivos de acuerdo a la relación entre radios de curvatura de las curvas de entrada y de salida.

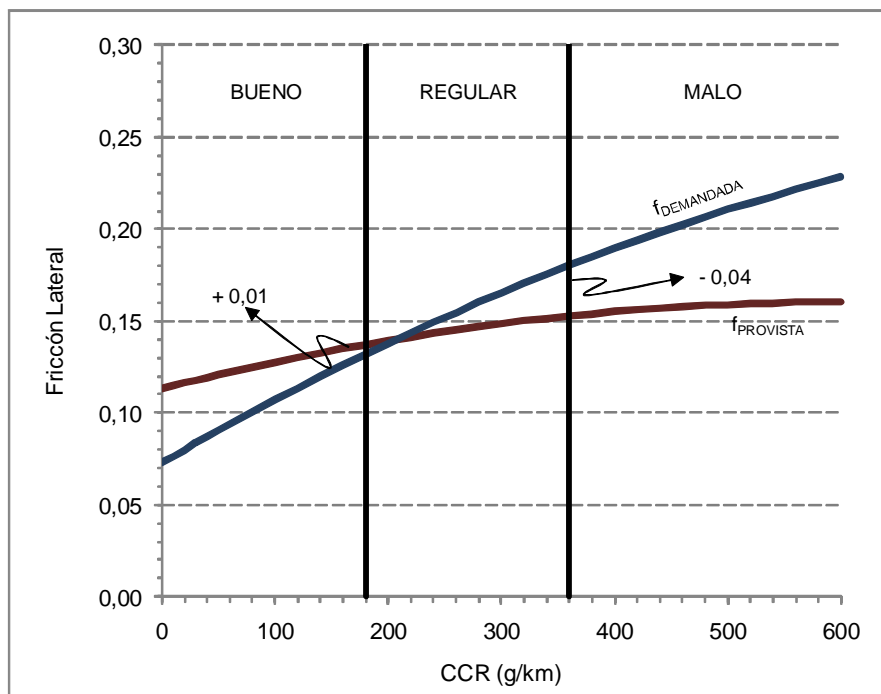


Figura 1: Rangos de consistencia en curvas sucesivas en base a datos de Alemania (adaptado de Lamm et al, 2007).



La Figura 2 ilustra en base a datos de Estados Unidos el criterio III de consistencia en función de la tasa de cambio de curvatura.

**Figura 2: Variación de la fricción demandada y provista en función de la tasa de cambio de curvatura (Adaptada de Lamm et al, 1991).**



A partir de este análisis se desprende que para proponer valores umbrales de consistencia para cada indicador, es imprescindible el contar con datos de accidentes, a fin de determinar relaciones específicas entre la causalidad de accidentes y la geometría del trazado.

Son pocos los estudios que actualmente han permitido desarrollar criterios propios, y en la mayoría de los casos las diversas investigaciones optan por usar los criterios propuestos originalmente por Lamm. Sin embargo, dichos valores deben tomarse sólo como referenciales, en tanto no se disponga de medios para realizar calibraciones locales de los modelos de consistencia.

### **Criterios para velocidad de aproximación en curvas**

Para este caso, los criterios existentes en la literatura se clasifican en dos principios. Uno asociado al control de la deceleración a fin de reducir la variación de V85 desde la tangente de entrada hasta la curva circular, y la aceleración en la salida de la curva. Fue propuesto por Fitzpatrick et al (2000). Otro referido al control de la velocidad de aproximación y de la deceleración, propuesto por Steyer et al (2000). El primero se ilustra en la Tabla 2.

**Tabla 2: Criterios de consistencia para el control de aceleración y deceleración en curvas simples (Fitzpatrick et al, 2000).**

Deceleración $d$ (m/s <sup>2</sup> )	Clasificación del Diseño	Aceleración $a$ (m/s <sup>2</sup> )
$1,0 \leq d \leq 1,48$	Bueno	$0,54 \leq a \leq 0,89$
$1,48 < d \leq 2,0$	Crítico	$0,89 < a \leq 1,25$
$d > 2,0$	Peligroso	$a > 1,25$

El criterio de Steyer et al (2000) obedece al segundo principio, bajo el supuesto que tanto la velocidad de aproximación como la deceleración poseen igual nivel de ponderación. Con esto, plantearon los criterios descritos en la Tabla 3.

**Tabla 3: Criterios de consistencia para el control de la velocidad de aproximación y aceleración / deceleración en curvas simples (Steyer et al, 2000).**

$K_{EV} = \frac{V_{85,CURVA}}{V_{85,APP}}$	Valor de Deceleración de un vehículo cuando entra a una curva.		
	$a < 0.8 \text{ m/s}^2$	$0.8 \text{ m/s}^2 < a \leq 1.4 \text{ m/s}^2$	$a > 1.4 \text{ m/s}^2$
$K_{EV} \geq 0.9$	Buen	Comportamiento crítico del conductor	
$0.9 > K_{EV} \geq 0.75$	Comportamiento		
$K_{EV} < 0.75$	Comportamiento crítico del conductor		Peligroso

$V_{85, CURVA}$ :  $V_{85}$  en el punto medio de la curva;  $V_{85,APP}$ :  $V_{85}$  en el punto medio del segmento de aproximación;

### Criterios De Polus – Mattar-Habib

El criterio de Polus y Mattar-Habib se basa en el modelo de consistencia de la ecuación 8. En la Tabla 4 se muestran los valores propuestos por los autores. Ellos plantean que si bien el criterio final a utilizar está referido al índice de consistencia (  $C$  ) es necesario para ello definir los estados de las otras variables. Dichos umbrales están calibrados para rutas con valores de consistencia previamente conocidos, por lo cual representan sólo casos particulares.

**Tabla 4. Criterios de Consistencia de Modelo de Polus y Mattar-Habib (2004).**

Medida de Consistencia	Valores umbrales		
	Bueno	Aceptable	Pobre
Índice de Consistencia	$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$
Área Relativa	$Ra \leq 1$ (m/s)	$1 < Ra \leq 2$ (m/s)	$Ra > 2$ (m/s)
Desviación Estándar	$\sigma \leq 5$ (Km/h)	$5 < \sigma \leq 10$ (Km/h)	$\sigma > 10$ (Km/h)

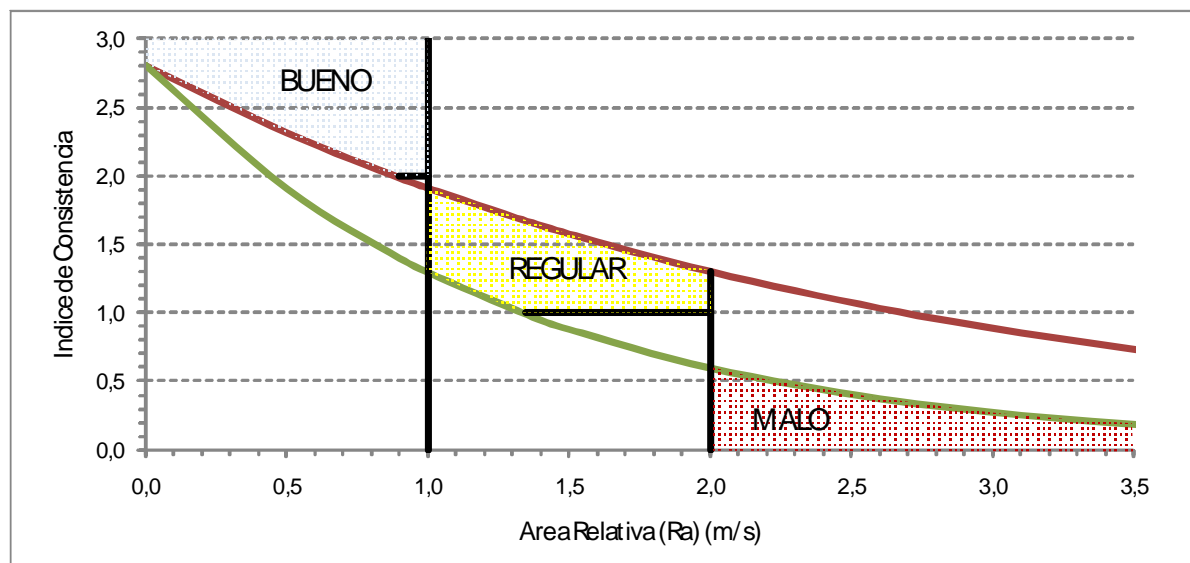
Para una curva circular simple, un diseño bueno bajo el enfoque de Lamm equivale a un diseño aceptable bajo el criterio de Polus ( $C_i < 10$  km/h equivale aproximadamente a  $C < 1,42$ ), y un diseño malo bajo el criterio de Lamm equivale a un diseño pobre bajo el enfoque de Polus ( $C_i > 20$  km/h equivale aproximadamente a  $C < 0,4$ ).

De este modo, el criterio de Polus resulta más exigente que el criterio de Lamm especialmente para el caso de diseño en la categoría “aceptables”.

Una consideración importante de tener en cuenta es que el método de análisis de Polus y Mattar-Habib solo es comparable con el método de Lamm en tanto se utilicen las mismas configuraciones utilizadas por Lamm. En caso contrario la comparación carece de sentido por cuanto se estaría comparando un modelo generalizado con otro específico.

La Figura 3 muestra gráficamente los criterios de la Tabla 4. Los criterios se aplican en conjunto por la cual existe una región factible restringida sobre la cual el diseño se categoriza como “Bueno” y/o “Aceptable”. Se puede apreciar que el criterio planteado por estos autores es restrictivo a casos específicos lo cual puede en la práctica determinar un intervalo de variables estrecho para el diseñador.

**Figura 3: Expresión Gráfica de los Criterios de y Polus y Mattar-Habib (2004).**



No obstante, éste método permite en forma razonable realizar una calificación global del trazado que no es posible al aplicar directamente el criterio de Lamm. Pero en contraparte, es posible utilizar ambos criterios en conjunto si se ensamblan convenientemente, de modo tal que los criterios de Lamm se utilicen para identificar y corregir elementos específicos y el de Polus y Mattar-Habib para ver el impacto de dichos mejoramientos en el trazado completo.

### **ALGUNOS CRITERIOS PARA LA IMPLEMENTACION DEL ANÁLISIS DE CONSISTENCIA**

En términos generales, los criterios de implementación pueden clasificarse en esenciales y complementarios. Los esenciales son aquellos que ineludiblemente se deben cumplir de modo tal que permitan una posterior implementación de la aplicación de la normativa.

Los complementarios por su parte, deben ser incluidos en diversas partes de la normativa a fin de que el diseño sea realizado en forma integrada. A continuación se discuten básicamente criterios esenciales.

En secciones precedentes de este trabajo en caminos diseñados para velocidades de diseño inferiores a 90 km/h, la velocidad de operación excede la velocidad de diseño. Por otro lado, a velocidades inferiores a 50 km/h, la condición de estabilidad dinámica de la

conducción pierde relevancia, adquiriendo importancia la trayectoria y disponibilidad de espacio para maniobras. En este sentido el campo de aplicación del análisis de consistencia está restringido a un rango de velocidades de diseño entre 50 y 90 km/h.

El análisis de consistencia puede aplicarse al diseño de trazados nuevos o al mejoramiento de trazados existentes. En el primer caso, se debe contar con modelos matemáticos que describan el valor de los indicadores de consistencia con respecto a variables geométricas del trazado, tales como radio de curvatura, tasa de cambio de curvatura, peralte, ancho de carril, parámetros de curvatura de curvas verticales, entre otros. En el segundo caso, es más adecuado el realizar mediciones de velocidad de operación para, en conjunto con los modelos matemáticos disponibles, lograr calcular indicadores de consistencia y aplicar los criterios correspondientes.

La mayoría de las instrucciones de diseño proponen métodos analíticos para el cálculo de los elementos del alineamiento vertical u horizontal en forma aislada. La filosofía del análisis de consistencia propende hacia lo contrario. Esto es, el lograr armonía en y entre los elementos de trazado. Por tal motivo es importante incluir en las primeras partes de las normativas, elementos que permitan integrar este efecto de armonización del diseño respecto de los diferentes elementos de diseño.

Una de las principales herramienta para el análisis de consistencia es el contar con perfiles de velocidad de diseño y de operación que permita contrastar en cada progresiva la diferencia entre ambas. Habitualmente las normativas de diseño (salvo la norma Suiza), no incluyen estos conceptos y en consecuencia los medios para construirlo.

Particularmente, en el caso del perfil de velocidad de operación, es inevitable el contar con modelos de velocidad de operación, adoptados o calibrados, que permitan en la etapa de diseño predecir el valor de velocidad a la cual circulará el conductor.

Respecto de los criterios de evaluación, se debe tener presente los valores críticos para clasificar diseños en bueno, regular y malo, fueron calibrados mediante agrupación por conglomerados con registros de accidentes de Estados Unidos y Alemania. Por tal motivo, aún cuando hoy en día son la única alternativa disponible, se debe establecer que son sólo una referencia que puede variar radicalmente de un país a otro, teniendo en cuenta el grado de educación vial de los conductores, de aversión al riesgo y de tecnología automotriz.

En este sentido, es recomendable que en las normativas establezcan opciones de modificarlos en el futuro y teniendo en cuenta que para ello se requiere contar con un registro nacional de accidentes, lo cual en la mayoría de los países sub-desarrollados y en vías de desarrollo no existen o es demasiado costoso el implementarlas.

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo se desarrolló el concepto de consistencia del diseño sobre la base de indicadores y criterios de evaluación. Para ello se consideró una amplia y actualizada bibliografía que permite visualizar el desarrollo durante 30 años de este enfoque de diseño. En atención a lo anterior, se elaboraron las conclusiones que a continuación se exponen.

Los enfoques de diseño han ido adaptando en el tiempo sus metodologías, modelos y enfoques para incorporar una mejor comprensión del comportamiento del conductor, y a la vez, integrar al sistema de transporte en forma adecuada la infraestructura vial. Es así como en la actualidad, los diseños están propendiendo hacia una mayor flexibilidad, contextualización con el medio y una mejora sustantiva en el tratamiento de la seguridad vial desde el inicio del diseño geométrico.

Dentro de este contexto, la consistencia del diseño surge como un complemento de las técnicas de diseño que posee la virtud de proporcionar medios concretos a los diseñadores para evaluar la calidad de sus diseños. En este sentido, el enfoque de consistencia en el diseño debe entenderse como un complemento y no como un sustituto de otros enfoques de diseño.

El análisis de consistencia puede clasificarse en diversas ramas según la hipótesis dominante que los creadores de cada una de ellas han adoptado: Homogeneidad del trazado, diferencias de velocidad, carga mental y análisis agregado. No obstante todas ellas tienen un punto común que es el objetivo de lograr medir racionalmente las expectativas de los conductores, entendiendo que es esta variable subjetiva la que mejor describe la percepción del trazado y del ambiente de conducción y por tanto la adopción de determinadas maniobras por parte de los conductores.

Dependiendo de la hipótesis que sustenta cada enfoque de análisis, los investigadores han desarrollado indicadores de consistencia y sus respectivos criterios de evaluación. Los primeros permiten cuantificar las expectativas a través de medidas cuantitativas de características geométricas, cinemáticas, conductuales y/o psico-fisiológicas de los conductores. En tanto que los segundos tienen por objetivo, a partir de los indicadores, cualificar los diseños a fin de establecer elementos específicos o segmentos de trazado que requieren algún tipo de mejoramiento o adaptación.

Un aspecto esencial para la aplicación de cualquiera de los métodos de análisis de consistencia es el contar con modelos calibrados localmente que describan relaciones explícitas entre variables explicativas de los indicadores de consistencia, tales como velocidad, fricción, aceleración, visibilidad, carga mental y elementos geométricos del trazado.

Aún cuando existen numerosos estudios al respecto, aún el estado del arte es insuficiente para elaborar modelos continuos que consideren todos los elementos del trazado altimétrico, planimétrico y su coordinación tridimensional.

Una de las principales limitaciones del análisis de consistencia es la calibración de los criterios de consistencia. En efecto los principales criterios disponibles en la literatura, han sido calibrados en base a estadísticas de accidentes, las cuales no siempre están disponibles en cantidad, calidad y oportunidad. En este sentido un importante desafío de la disciplina es desarrollar métodos alternativos para estimar estos criterios de consistencia.

Para lograr una efectiva inclusión del análisis de consistencia en las normativas de diseño es menester lograr una integración de los principios y filosofía del diseño consistente en las etapas tempranas del diseño. Esto solo se logra desarrollando a lo largo de los procedimientos de diseño criterios que hagan propender al diseño consistente. Asimismo, es necesario contar con un desarrollo auto contenido, conciso y a la vez estructurado y fundamentado sobre el análisis de consistencia como complemento al diseño tradicional.



## REFERENCIAS

- Al-Masaeid, H, Hamed, M Aboul-Ela, M y Ghannam, A (1995). Consistency of Horizontal Alignment for Different Vehicle Classes. *Transportation Research Record* 1500, 178 – 183.
- Bavkov, V (1968). Road Design and Traffic Safety. *Traffic Engineering & Control*, 9, 236 – 239.
- Barnett, J (1940). *Transition Curves for Highways*. Federal Works Agency, Public Road Administration. 1<sup>st</sup> edition, United States.
- Castro, M Pardillo-Mayora, J y Sánchez, J (2005). Alignment indices as a tool to evaluate safety and design consistency in two lane rural roads. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Highway Geometric Design, Chicago, Estados Unidos.
- De Solminihac, H Echaveguren, T and Vargas S (2007). Friction reliability criteria applied to horizontal design of low volume roads. *Transportation Research Record* 1989, 138 – 147.
- De Waard, D (2002). Mental Workload, In Fuller, R and Santos, J (Eds). *Human factors for highway engineering*, 161 – 176. 1<sup>st</sup> Ed. Pergamon, Amsterdam.
- De Waard, D Anje Kruizinga A, y Brookhuis, K (2008). The consequences of an increase in heavy goods vehicles for passenger car drivers' mental workload and behaviour: A simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 818 – 828.
- Echaveguren, T y Sáez, J (2001). Indicadores de Consistencia en el Diseño Geométrico de Carreteras. *Actas del X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Octubre de 2001, 315 – 327.
- Echaveguren T y Basualto, M (2003). El análisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples en alineamientos horizontales. *Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. 20 al 24 de Octubre de 2003, Santiago, 391 – 402.
- Echaveguren, T Vargas, S Altamira, A y Riveros, D (2009). Consistencia del diseño geométrico basada en la visibilidad. Artículo enviado al XIV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Noviembre de 2009, Concepción, Chile.
- Fitzpatrick, K Elefteriadou, L Harwood, D Collins, J McFadden, J Anderson, I Krammes, R Irizarry, N Parma, K Bauer, K y Passetti, K (2000). *Alternative Design Consistency Rating Methods for Two – Lane Rural Highways*. Publication FHWA – RD – 99 – 172. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C., U.S.A.
- Fuller, R (2005). Towards a general theory of driver behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 37, 461–472
- Glennon, J y Harwood, D (1978). Highway design consistency and systematic design related to highway safety. *Transportation Research Record* 681, 77 - 88.

Irizarry, N y Krammes, R (1998). Linear Regression Models for Estimating Operating Speeds of Passenger Vehicles on Rural Two-lane Highways. Actas del X Congreso Panamericano de Transporte. Artículo No 12, 651 - 658. Santander, España.

Jahn, G Oehme, A Kreams, J y Gelau, Ch (2005). Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. *Transportation Research* 8F(3), 255 – 275.

Kanellaidis, G (1996). Human Factors in Highway Geometric Design. *Journal of Transportation Engineering*. 122(1), 59 – 66.

Krammes, R Rao, K and Oh, H (1995). Highway geometric design consistency software. *Transportation Research Record* 1500, 19 – 24.

Lamm, R y Choueiri, E (1987). Recommendations for Evaluating Horizontal Design Consistency Based on Investigation in the State of New York. *Transportation Research Record* 1122, 68 – 78.

Lamm, R Hayward, J y Cargin, J (1986). Comparison of Different Procedures for Evaluating Speed Consistency. *Transportation Research Record* 1100, 10 – 20.

Lamm, R Choueiri, E and Mailaender, T (1991). Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. *Transportation Research Record* 1303, 11 – 21.

Lamm, R Psarianos, B y Mailaender, T (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook*. 1st Edition. New York: Mcgraw Hill, USA.

Lamm, R Beckm A Ruscher, T Mailaender, T Cafiso, S and La Cava, G. (2007). *How to make Two-Lane Rural Roads Safer*. 1st Edition, WIT Press, Great Britain.

Makishita, H y Matsunaga, K (2008). Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload. *Accident Analysis and Prevention* 40 567–575.

McDonald; L y Ellis, N (1975). Driver Workload fro various turn radii and speeds. *Transportation Research Record* 556, 18 – 30.

McLean, J (1981). Driver speed behavior and rural road alignment design. *Traffic Engineering & Control*, 4, 208 – 211.

McFadden, J y Elefteriadou, L (2000). Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency of Two-Lane Rural Highways. *Transportation Research Record* 1737, 9 – 17.

Messer, C (1980). Methodology for Evaluating Geometric Design Consistency. *Transportation Research Record* 757, 7 – 14.

Misaghi, O y Hassan, Y (2004). Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 408 – 418.

Navin, F.D.P y Musa, P (2004a). The effect of speed and driver adaptative strategies on

driver workload assessment. Paper 04-1570. TRB 2004 Annual Meeting, Washington, Estados Unidos.

Navin, F.D.P y Musa, P (2004b). A driver workload approach to the evaluation of geometric design consistency. Paper 04-2885. TRB 2004 Annual Meeting, Washington, Estados Unidos.

Oglesby, C (1984). Consistency in design for low-volume rural roads. *Journal of Transportation Engineering* 111(5), 510 – 519.

Park, Y y Saccomanno, F (2006). Evaluating speed consistency between successive elements of a two-lane rural highways, *Transportation Research*, 40A(5), 375 – 385.

Patten, C Kircher, A Ostlund, J Nilsson, L y Svenson, O (2006). Driver experience and cognitive workload in different traffic environments. *Accident Analysis and Prevention* 38, 887–894

Piechulla, W Mayser, C Gehrke, H y König, W (2006). Reducing drivers mental workload by means of an adaptive man-machine interface, *Transportation Research*, 6F(4), 233–248

Polus, A y Dagan, D (1987). Models for Evaluating The Consistency of Highway Alignment. *Transportation Research Record* 1122, 47 – 56.

Polus, A y Mattar-Habib, C (2004). New consistency model for rural highways and its relationship to safety. *Journal of Transportation Engineering*, 130(3), 286 – 293.

Powers, RD Hall, JW Hall, LE y Turne, DS (1995). The "Forgiving Roadside" Design of Roadside Elements. 1st International Symposium on Highway Geometric Design, Boston, Estados Unidos.

Stamatiadis, N (2005). Context-Sensitive Design: Issues with Design Elements. *Journal of Transportation Engineering*, 131(5), 374 – 378.

Steyer, R Sossoumihen, A y Weise, G (2000). Traffic Safety on two – lane roads. News concepts and findings. 2nd International Symposium on Highway Geometric Design Practices. 299 – 311. Alemania.

Van der Horst, R (2004). Occlusion as a measure for visual workload: an overview of TNO occlusion research in car driving. *Applied Ergonomics* 35, 189–196

Wilde, G (1998). Risk homeostasis theory: an overview. *Injury Prevention*, 4, 89-91.