



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería – Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en
Ingeniería Civil

**MODELO DE MARGEN DE SEGURIDAD PROBABILÍSTICO PARA
CURVAS HORIZONTALES DE CARRETERAS BIDIRECCIONALES**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Civil

FELIPE ANDRÉS MUÑOZ MATAMALA

CONCEPCIÓN – CHILE

2026

Profesor Guía: Dr. Tomás Echaveguren Navarro
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

Dedicatoria

A Andrea, por su amor incondicional, por sostenerme en los días difíciles y por acompañarme con alegría en cada uno de nuestros logros.

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi profesor guía, Dr. Tomás Echaveguren Navarro, por su constante apoyo, dedicación y compromiso durante el desarrollo de este trabajo.

Resumen

El factor de fricción lateral es un parámetro crítico en el diseño geométrico de curvas horizontales, ya que influye en la estabilidad dinámica de los vehículos y en la comodidad de los conductores y ocupantes que transitan por trayectorias curvas. Las normativas actuales de ingeniería vial evalúan la seguridad mediante modelos determinísticos, como el Modelo de Masa Puntual, los cuales asumen velocidades constantes y umbrales de fricción fijos. Sin embargo, este enfoque tradicional no considera la naturaleza estocástica del comportamiento del conductor ni la degradación temporal y espacial de las propiedades superficiales del pavimento. En consecuencia, existe una brecha científica significativa en la cuantificación del riesgo real de deslizamiento bajo condiciones operacionales reales, donde la demanda frecuentemente supera los supuestos de diseño.

Este estudio propone expresiones analíticas para estimar la probabilidad de deslizamiento de vehículos livianos en curvas horizontales de caminos rurales bidireccionales, incorporando la variabilidad inherente tanto de la demanda como de la oferta de fricción, materializada en un margen de seguridad probabilístico usando principios de confiabilidad.

Se detalla la calibración de modelos de demanda de fricción, junto con la integración del Índice Internacional de Fricción para representar la oferta del pavimento y la formulación de un modelo logístico parametrizado para la estimación del margen de seguridad probabilístico. Los resultados demuestran que la resistencia al deslizamiento es el principal determinante de la seguridad, mientras que la velocidad de operación actúa como un catalizador decisivo en el incremento del riesgo.

Al reemplazar las evaluaciones binarias de seguridad por un enfoque basado en la confiabilidad, esta investigación proporciona una herramienta práctica para la gestión del riesgo de deslizamiento a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura vial, considerando diversos contextos de conducción..

Abstract

The side friction factor is a critical parameter in the geometric design of horizontal curves, as it influences vehicle dynamic stability and the comfort of drivers and occupants traveling along curved paths. Current highway engineering standards assess safety through deterministic models, such as the Mass Point Model, which assume constant speeds and fixed friction thresholds. However, this traditional approach does not consider the stochastic nature of driver behavior nor the temporal and spatial degradation of pavement surface properties. Consequently, a significant scientific gap exists in quantifying the actual risk of skidding under real-world operating conditions, where demand frequently exceeds design assumptions.

This study proposes analytical expressions for estimating the probability of skidding of light vehicles on horizontal curves of two-lane rural roads, incorporating the inherent variability of both friction demand and friction supply, materialized in a probabilistic margin of safety using reliability principles.

The calibration of friction demand models is detailed, along with the integration of the International Friction Index to represent pavement supply and the formulation of a parameterized logistic model for estimating the probabilistic margin of safety. The results demonstrate that skid resistance is the primary determinant of safety, while operating speed acts as a decisive catalyst in the increase of risk.

By replacing binary safety assessments with a reliability-based approach, this research provides a practical framework for managing skidding risk throughout the lifecycle of road infrastructure under diverse driving conditions.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Hipótesis de investigación.....	2
1.3	Objetivo general.....	2
1.4	Objetivos específicos.....	2
1.5	Metodología de trabajo.....	2
1.6	Principales resultados y conclusiones.....	3
1.7	Alcances de la tesis.....	4
1.8	Organización del informe.....	4
CAPÍTULO 2	FENÓMENO DEL DESLIZAMIENTO.....	5
2.1	Introducción.....	5
2.2	El fenómeno del deslizamiento.....	5
2.2.1	Equilibrio dinámico en curvas horizontales.....	5
2.2.2	El modelo de tres zonas.....	7
2.3	Oferta de fricción lateral.....	8
2.4	Demanda de fricción lateral.....	9
2.5	Margen de seguridad en curvas horizontales.....	11
2.6	Principios de confiabilidad.....	14
2.7	Aplicaciones de principios de confiabilidad en curvas horizontales.....	16
2.8	Conclusiones.....	18
CAPÍTULO 3	PROBABILIDAD DE DESLIZAMIENTO.....	20
3.1	Introducción.....	20
3.2	Variables explicativas.....	20
3.3	Función de estado límite.....	22
3.4	Datos de entrada.....	23
3.5	Modelación de curvas de probabilidad.....	24
3.6	Conclusiones.....	28
CAPÍTULO 4	MODELO DE MARGEN DE SEGURIDAD PROBABILÍSTICO.....	30
4.1	Introducción.....	30
4.2	Ajuste de funciones a los datos simulados.....	30

4.3	Parametrización del modelo de margen de seguridad probabilístico	31
4.4	Aplicaciones del margen de seguridad probabilístico	32
4.5	Conclusiones.....	35
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Modelos agregados de demanda de fricción lateral.	10
Tabla 3.1 Niveles y rangos de las variables explicativas del modelo.	21
Tabla 3.2 Funciones de densidad de probabilidad de la macrotextura y de la resistencia al deslizamiento.....	23
Tabla 3.3 Funciones de densidad de probabilidad del radio y la velocidad de operación en el punto medio de la curva.	24
Tabla 4.1 Modelos analíticos del margen de seguridad probabilista.	31
Tabla 4.2 Correlación entre la resistencia al deslizamiento, la velocidad y la macrotextura, y los parámetros del modelo logístico del PMOS.....	32
Tabla 4.3 Radios mínimos para una velocidad de operación de la tangente de entrada de 50 km/h en distintos niveles de PMOS.	34
Tabla 4.4 Radios mínimos para una velocidad de operación de la tangente de entrada de 90 km/h en distintos niveles de PMOS.	34
Tabla 4.5 Velocidad de operación en el centro de la curva límite para evitar el deslizamiento para un PMOS de 0.5.	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de las fuerzas actuantes sobre un vehículo al desplazarse por una curva horizontal.....	6
Figura 2.2 Representación gráfica de los modelos de fricción	7
Figura 3.1 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva alta.....	25
Figura 3.2 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva baja.....	26
Figura 3.3 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva alta por sentido de la dirección de la curva.....	27
Figura 3.4 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva baja por sentido de la dirección de la curva.....	28

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las normas de diseño geométrico se basan en el equilibrio entre el factor de fricción lateral de diseño y la demanda de fricción, derivada del modelo de masa puntual, para determinar el radio geométrico, el peralte, la velocidad y la fricción de diseño. En este contexto, la fricción representa el umbral de comodidad aceptable de conducción, suponiendo que los vehículos circulan a una velocidad constante igual o inferior a la velocidad de diseño. La velocidad de operación frecuentemente difiere de la velocidad de diseño, generando variaciones en la aceleración lateral y, por ende, en la demanda real de fricción.

Esta discrepancia entre condiciones de diseño y reales de operación ha motivado el desarrollo del concepto de margen de seguridad, definido como la diferencia entre la fricción proporcionada por el pavimento y la fricción demandada por el vehículo. Las formulaciones propuestas en la literatura son determinísticas y no incorporan explícitamente la variabilidad inherente a la velocidad de operación, a las características geométricas de las curvas ni a las propiedades del pavimento. En consecuencia, los márgenes de seguridad obtenidos no son necesariamente transferibles entre distintos contextos geométricos y operacionales.

En este contexto, surge la necesidad de reformular el análisis del deslizamiento en curvas horizontales desde una perspectiva probabilística, incorporando explícitamente la incertidumbre asociada a las variables geométricas, operacionales y del pavimento.

Este trabajo presenta la estimación analítica de la probabilidad de deslizamiento para vehículos livianos, usando principios de confiabilidad. Estas curvas de probabilidad se pueden utilizar para el diseño geométrico de curvas horizontales. O bien para determinar valores de velocidad límite para vehículos en curvas horizontales asociadas a una cierta probabilidad de ocurrencia de deslizamiento. El método propuesto utiliza el enfoque de estimación analítica de curvas de probabilidad, el que se realiza con el método FORM.

1.2 Hipótesis de investigación

La probabilidad de deslizamiento de vehículos livianos en curvas horizontales aumenta cuando la resistencia al deslizamiento del pavimento y la macrotextura se reducen, especialmente en curvas de bajo radio geométrico y bajo condiciones de elevadas velocidades de operación.

1.3 Objetivo general

Determinar el efecto de la geometría, condición del pavimento y velocidad en la probabilidad de deslizamiento de vehículos livianos en curvas horizontales de caminos rurales bidireccionales, usando principios de confiabilidad.

1.4 Objetivos específicos

- Identificar las variables geométricas, operacionales y del pavimento que explican la probabilidad de deslizamiento de vehículos livianos en curvas horizontales.
- Modelar la probabilidad de deslizamiento mediante la simulación de la función de estado límite y la construcción de curvas de probabilidad.
- Formular expresiones analíticas que permitan estimar la probabilidad de deslizamiento utilizando principios de confiabilidad.

1.5 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo se estructuró en cuatro etapas principales: (i) diseño experimental; (ii) modelación del margen de seguridad probabilístico; (iii) parametrización del modelo propuesto; y (iv) desarrollo de aplicaciones. La primera etapa consistió en una revisión exhaustiva de los márgenes de seguridad existentes en la literatura, incluyendo la descripción del deslizamiento y de los factores que intervienen en el fenómeno. Con base en estos antecedentes, se definieron las variables relevantes y se estructuró el diseño experimental mediante la definición de los escenarios de simulación. La segunda etapa consistió en el

desarrollo y posterior simulación de la función de estado límite que permite estimar la probabilidad de deslizamiento para los diversos escenarios de diseño y operación. En la tercera etapa, se parametrizaron los modelos de probabilidad de deslizamiento mediante el ajuste de diversas funciones sigmoidales a los datos simulados, permitiendo generalizar los resultados obtenidos. Finalmente, en la cuarta etapa se utilizó el modelo para la estimación de radios mínimos y velocidades límite en curvas horizontales.

1.6 Principales resultados y conclusiones

Se desarrolló un modelo probabilístico que permite estimar la probabilidad de deslizamiento de vehículos livianos en curvas horizontales de caminos rurales bidireccionales, incorporando explícitamente la variabilidad de la fricción lateral mediante principios de confiabilidad.

Los resultados mostraron que la probabilidad de deslizamiento de un vehículo liviano en una curva horizontal está explicada principalmente por el efecto de cuatro variables: (i) la velocidad de operación, (ii) el radio geométrico de la curva, (iii) la resistencia al deslizamiento del pavimento y (iv) la macrotextura del pavimento.

Se observó que la probabilidad de deslizamiento aumenta significativamente al disminuir el radio de la curva y la resistencia al deslizamiento. Asimismo, se verificó que tanto la fricción de operación como su dispersión disminuyen al incrementarse el radio.

La calibración de un modelo logístico permitió expresar esta relación en forma analítica, facilitando la estimación directa de la probabilidad de falla en función de los parámetros geométricos y superficiales considerados.

En consecuencia, los resultados permiten aceptar la hipótesis planteada, confirmando que la probabilidad de deslizamiento aumenta al incrementarse la velocidad de operación y al disminuir el radio geométrico y la resistencia al deslizamiento del pavimento.

1.7 Alcances de la tesis

En la investigación se consideraron velocidades de diseño y velocidades de operación de aproximación a la curva horizontal comprendidas entre 40 y 100 km/h, en concordancia con los valores establecidos en el Volumen 3 del Manual de Carreteras de Chile para carreteras pavimentadas, rurales y bidireccionales.

En relación con las características superficiales del pavimento, se adoptaron valores de resistencia al deslizamiento comprendidos entre 40 y 100%, mientras que la macrotextura del pavimento se consideró en un rango entre 0.5 y 1.1 mm.

1.8 Organización del informe

La tesis se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 presenta la motivación, los objetivos general y específicos, el plan de trabajo y los principales resultados obtenidos. El Capítulo 2 aborda los márgenes de seguridad existentes asociados a curvas horizontales, los principios de confiabilidad y los factores operativos, geométricos y físicos involucrados en el fenómeno del deslizamiento. El Capítulo 3 describe la metodología empleada para la estimación de la probabilidad de falla mediante el método de análisis de confiabilidad de primer orden, incluyendo la formulación de la función de estado límite y la descripción de las variables de entrada. En el Capítulo 4 se presenta la parametrización de las curvas de probabilidad y el desarrollo de ejemplos de aplicación asociados al cálculo de radios mínimos de diseño y límites de velocidad. Finalmente, el Capítulo 5 expone las principales conclusiones y propone líneas de investigación futura.

CAPÍTULO 2 FENÓMENO DEL DESLIZAMIENTO

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta el concepto físico de la fricción lateral y su relación con los parámetros geométricos de las curvas horizontales. Se definen y presentan los modelos existentes en la literatura sobre los márgenes de seguridad entre la fricción de diseño y la fricción de operación. Se introducen las aplicaciones de principios de confiabilidad en el diseño geométrico.

2.2 El fenómeno del deslizamiento

2.2.1 Equilibrio dinámico en curvas horizontales

Durante la conducción, los usuarios utilizan la información proporcionada por la vía para ajustar la velocidad con la que transitan cada elemento geométrico del camino, siendo la percepción visual la principal fuente de referencia (Köhler et al., 2023).

En una curva horizontal, el vehículo se encuentra sometido a diversas fuerzas verticales y horizontales, cuyo equilibrio en el plano transversal condiciona su estabilidad dinámica. En la Figura 2.1 se presenta un esquema de dichas fuerzas, mientras que la relación de equilibrio en el plano horizontal se expresa mediante la Ecuación 2.1.

Al incorporar explícitamente la demanda puntual de fricción (f) y el efecto del peralte (e), esta relación puede reformularse como se muestra en la Ecuación 2.2.

Desde la perspectiva del diseño geométrico, las curvas horizontales constituyen los tramos más críticos en términos de seguridad, ya que en ellas se desarrolla una aceleración lateral asociada al movimiento curvilíneo. Esta aceleración es proporcional al cuadrado de la velocidad e inversamente proporcional al radio de la curva, por lo que incrementos en la velocidad o reducciones en el radio aumentan la demanda de fricción.

$$W \cdot \sin(\alpha) + F_f = F \cdot \cos(\alpha), \tag{2.1}$$

$$W \cdot \sin(\alpha) + f \cdot \left(W \cdot \cos(\alpha) + \frac{W \cdot v^2}{g \cdot R} \sin(\alpha) \right) = \frac{W \cdot v^2}{g \cdot R} \cdot \cos(\alpha), \tag{2.2}$$

Donde, W es el peso del vehículo (N), F_f es la fuerza de roce (N), α es la inclinación transversal de la curva (rad), F es la fuerza centrífuga (N), f es el coeficiente de fricción lateral (adim), g es el coeficiente gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$) y V es la velocidad del vehículo (m/s), R es el radio geométrico de la curva (m).

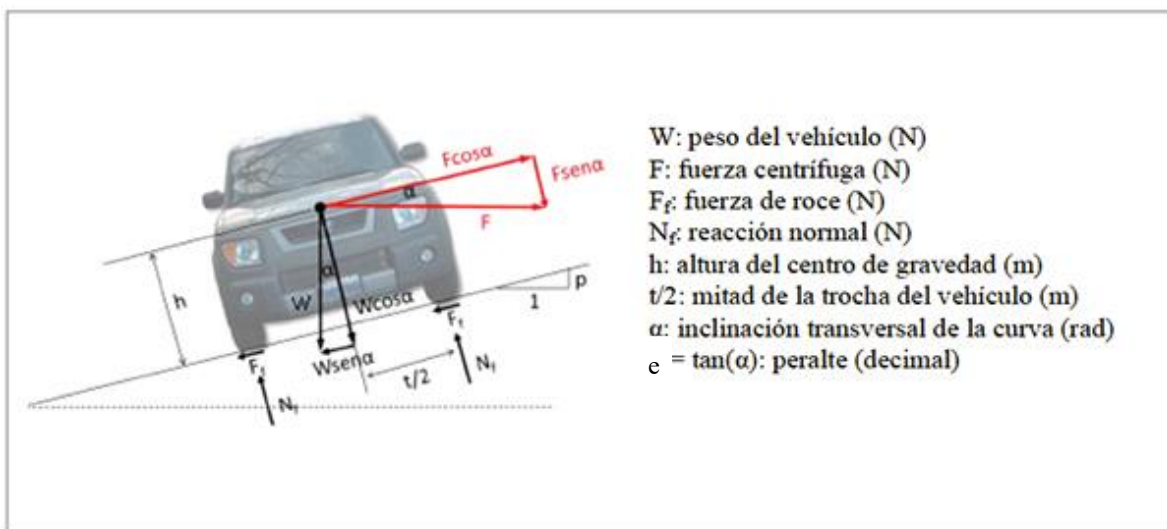


Figura 2.1 Esquema de las fuerzas actuantes sobre un vehículo al desplazarse por una curva horizontal (adaptado de Cruz et al., 2017)

Tras el desarrollo algebraico y la simplificación correspondiente, se obtiene la expresión que permite determinar el radio mínimo de la curva horizontal que evita el deslizamiento en función de la velocidad, el coeficiente de fricción lateral y el peralte (e , decimal), la cual se presenta en la Ecuación 2.3.

$$R = \frac{V^2}{g \cdot (f + e)} \tag{2.3}$$

$$f = \frac{V^2}{g \cdot R} - e \tag{2.4}$$

La fricción es una característica funcional del pavimento que está directamente relacionada con la seguridad vial. Desde un punto de vista práctico, la fricción puede definirse como la interacción entre la macrotextura del pavimento, la microtextura de los áridos y la resistencia al deslizamiento.

2.2.2 El modelo de tres zonas

El modelo de tres zonas explica bajo un concepto unificado de relaciones fricción – velocidad – radio, en el cual se superponen funciones de fricción de operación, de fricción de diseño, umbral por normativa de fricción y fricción del pavimento (de Solminihaç *et al.*, 2007). El modelo es presentado en la Figura 2.2, en el cual se delimitan zonas o márgenes de seguridad. Se destaca que la interacción de la demanda puntual de fricción, descrita en la Ecuación 2.4, y la función de fricción del pavimento corresponde a la velocidad límite de deslizamiento (V_l).

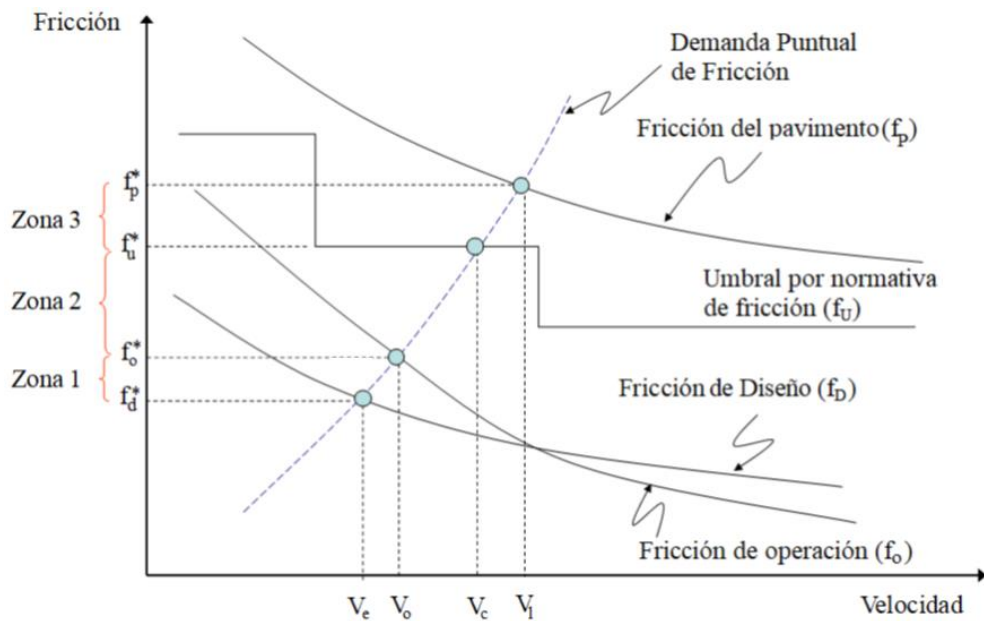


Figura 2.2 Representación gráfica de los modelos de fricción (adaptado desde de Solminihaç *et al.*, 2007)

La fricción de operación (f_o) corresponde a la demanda de fricción de los conductores. La fricción de diseño (f_d) es el umbral a partir del cual los ocupantes del vehículo comienzan a experimentar incomodidad debido a la acción de la aceleración lateral. En cuanto a la fricción

del pavimento (f_p) representa el coeficiente de fricción más alto que se puede alcanzar entre un neumático y la superficie del pavimento. Está influenciado mayormente por la macrotextura del pavimento, la microtextura de los agregados y la resistencia al deslizamiento. Por último, el umbral por normativa de fricción (f_u) es el valor límite admisible de fricción que determina la normativa en el diseño e indica cuándo es necesario intervenir para restituir las condiciones de fricción del pavimento. (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2001; Echaveguren y Vargas-Tejeda, 2011).

2.3 Oferta de fricción lateral

La oferta de fricción lateral o fricción del pavimento está influenciada por la resistencia al deslizamiento, la macrotextura del pavimento y la velocidad del deslizamiento del neumático sobre la superficie del pavimento.

El efecto del flujo vehicular pule los áridos, reduciendo la microtextura, en consecuencia, la resistencia al deslizamiento, hasta alcanzar una condición de equilibrio en la que la resistencia al deslizamiento es mínima. Asimismo, la temperatura del pavimento, el clima y los efectos estacionales interactúan con la superficie del pavimento y los áridos, produciendo una oscilación de la resistencia al deslizamiento en torno a un valor de tendencia (Echaveguren *et al.*, 2006).

La resistencia al deslizamiento (RD) es un término genérico usado en ingeniería de pavimentos que describe el grado de adherencia entre neumático y pavimento. Desde el punto de vista de la tribología, corresponde a la razón entre una fuerza vertical ejercida por el peso de un cuerpo y la fuerza horizontal requerida para desplazar dicho cuerpo a una cierta velocidad. Esta razón corresponde al coeficiente de fricción o resistencia al deslizamiento.

La textura del pavimento se define como las desviaciones de la superficie del pavimento respecto de una superficie plana (Hall *et al.*, 2009). Estas profundidades pueden asociarse a longitudes de onda características, las cuales varían aproximadamente entre 10^{-3} y 10^5 mm.

En general, dichas longitudes de onda se clasifican en megatextura, macrotextura y microtextura, de acuerdo con sus dimensiones horizontales y verticales.

La resistencia al deslizamiento y la macrotextura del pavimento poseen una alta variabilidad, que puede clasificarse en variabilidad temporal y variabilidad de corte estático. La variabilidad temporal está asociada al tráfico, los agregados, precipitaciones, y estacionalidad climática. La variabilidad de corte estático se refiere a los factores asociados a condiciones particulares de superficie, neumático, ambientales y de lubricación (de Solminihac y Echaveguren, 2002).

La Asociación Mundial de la Carretera (PIARC) llevó a cabo ensayos extensivos utilizando dispositivos de medición de fricción y textura del pavimento. Como resultado de estas pruebas, se propuso un criterio para la evaluación de la resistencia al deslizamiento del pavimento mediante el Índice Internacional de Fricción (IFI) (Wambold et al., 1995). El IFI describe las propiedades de resistencia al deslizamiento como el resultado de la medición simultánea de la fricción y la macrotextura. Otro modelo calibrado y armonizado de fricción del pavimento es el Índice Europeo de Fricción (EFI, por sus siglas en inglés), el cual corresponde a una adaptación de IFI a su respectivo contexto local (FEHRL, 2006).

2.4 Demanda de fricción lateral

La demanda de fricción se define como el nivel de fricción que el sistema conductor-vehículo requiere para realizar una maniobra en condiciones de seguridad. Esta demanda se vincula directamente con la aceleración media a la que se ve sometido el sistema durante la ejecución de dicha maniobra. En función del tipo de acción involucrada, la demanda de fricción puede distinguirse en una componente longitudinal, asociada principalmente a procesos de frenado o aceleración, y una componente lateral, necesaria para mantener la estabilidad del vehículo al circular por una curva horizontal.

Los modelos utilizados para estimar la demanda de fricción lateral pueden agruparse en dos grandes categorías: modelos puntuales y modelos agregados. Los modelos puntuales

caracterizan la demanda de fricción como función de la velocidad de operación para un radio geométrico específico, considerado constante (Lamm et al., 1991; Morral y Talarico, 1994). Por su parte, los modelos agregados incorporan la relación existente entre el radio de la curva y la velocidad de circulación, permitiendo expresar la demanda de fricción de manera conjunta mediante una sola variable representativa (Bonneson, 1999; Gattis et al., 2005; Xu et al., 2015; Jiménez, 2016; Dharir y Hassan, 2019; Malaghan y Pawar, 2022).

De forma general, los modelos agregados muestran una tendencia decreciente de la demanda de fricción con el aumento de la velocidad. Este comportamiento se explica porque, a medida que el radio de curvatura aumenta, la influencia directa de la velocidad sobre la demanda de fricción se atenúa, mientras que la geometría de la curva adquiere un rol predominante en el comportamiento dinámico del vehículo.

Tabla 2.1 Modelos agregados de demanda de fricción lateral.

Año	Autor(es)	Modelo	R ²
1999	Bonneson	$f_{85} = 0.256 - 0.0022 \cdot V_{a,85} + 0.0133 \cdot (V_{a,85} - V_{c,85})$	0.96
2005	Gattis et al.	$f_{90} = 0.424 - 0.0042 \cdot V_{90}$	0.38
2015	Xu et al.	$f_{50} = \frac{3.4984 \cdot e^{-0.0117 \cdot V_{85}}}{g}$	0.97
		$f_{85} = \frac{6.2217 \cdot e^{-0.0134 \cdot V_{85}}}{g}$	0.98
2015	Wang et al.	$f_{85} = \frac{0.937 + \frac{663.4}{R} - 3.57 \cdot G}{g}$; C.H. con pendiente ascendente. $f_{85} = \frac{0.451 + \frac{798.5}{R} - 12.14 \cdot G}{g}$;C.H. con pendiente descendente. $f_{85} = \frac{0.203 + \frac{931.5}{R} + 0.0007 \cdot L}{g}$; C.H. con curva vertical convexa. $f_{85} = \frac{1.383 + \frac{539.1}{R}}{g}$; C.H. con curva vertical cóncava.	No reportado
2016	Jiménez	$f_{85} = \frac{\left(\frac{313.266}{R} + 9.018 \times 10^{-5} V_{85}^2 + 0.499C + 0.028\right)^{\frac{1}{0.984}}}{g}$	0.97

Año	Autor(es)	Modelo	R ²
2019	Dharir y Hassan	$f_{85} = \frac{0.103 + \frac{41.332}{R} - \frac{12.794}{V_L} + 0.0005 \cdot \Delta + 0.029 \cdot C + 0.021 \cdot T}{g}$	0.65
2022	Malaghan y Pawar	$f_{85} = 0.881 - 0.123 \cdot \ln(R)$	0.80

Donde, f_{85} : percentil 85 de la demanda de fricción lateral; f_{90} : percentil 90 de la demanda de fricción lateral; V_{85} : percentil 85 de velocidades en curva (km/h); V_{90} : percentil 90 de velocidades en curva (km/h); V_a : velocidad de aproximación a la curva (km/h); V_c : velocidad en la curva (km/h); g : constante gravitacional (9.81 m/s²); C : variable ficticia que indica el sentido de giro (es 0 si la curva va hacia la izquierda; es 1 si va hacia la derecha); G : razón de pendiente longitudinal; L : desarrollo de la curva horizontal (m); Δ : ángulo de deflexión (°); T : variable ficticia que indica el tipo de terreno (es 0 si es terreno llano; es 1 si es montañoso); V_L : límite de velocidad reglamentario (km/h); C.H.: curva horizontal.

Los modelos analizados en esta sección muestran que las variables principales que influyen en la demanda en la fricción lateral son la velocidad en la curva y el radio. A excepción del modelo de Jiménez (2016), los modelos descritos estiman el percentil 85 de la fricción lateral a partir de la fricción lateral máxima experimentada por los conductores durante la negociación de la curva, asumiendo una función de densidad de probabilidad normal. No obstante, Hugemann y Nickel (2003) identificaron una función de densidad de probabilidad asimétrica de una sola cola. De forma similar, los histogramas de aceleración lateral presentados por Xu et al. (2015) también sugieren una distribución de una sola cola. La suposición de normalidad en la distribución de probabilidad de la demanda de fricción lateral no resulta completamente evidente.

2.5 Margen de seguridad en curvas horizontales

La práctica habitual de diseño de curvas horizontales se basa en que existe un límite superior para la demanda de fricción lateral que los conductores consideran cómodo, por ende, los radios de curvas utilizados en el diseño deben generar demandas de fricción lateral iguales o inferiores a dicho límite de confort o fricción de diseño (Transportation Association of Canada, 1999; AASHTO, 2004; Ministerio de Obras Públicas de Chile [MOP], 2024).

A pesar de ello, investigaciones sugieren que los conductores más rápidos aceptan de manera habitual demandas de fricción lateral superiores a la fricción de diseño. (Chowdhury et al., 1991; Fitzpatrick et al., 1997; Bonneson 1999; Bonneson, 2000; Said *et al.*, 2009). Esto implica que los conductores pueden terminar negociando curvas a velocidades más altas y con mayores demandas de fricción lateral que aquellas para las cuales fueron diseñadas.

Como consecuencia, el margen de seguridad de fricción disminuye, la demanda de fricción puede superar a la fricción lateral de diseño y, en algunos casos, alcanzar la oferta de fricción del pavimento, particularmente cuando dicha oferta notablemente baja. En estas circunstancias, el riesgo de ocurrencia de accidentes aumenta de manera significativa.

Navin (1990) propuso una formulación probabilística del MOS, definida como la diferencia entre el radio de la curva (R_H) y el radio esperado demandado por el sistema conductor-vehículo (R_D), asumiendo que la aceleración lateral sigue una distribución normal. En este enfoque, la probabilidad de falla se estima como la razón entre el MOS y la raíz cuadrada de la varianza de R_D .

Lamm *et al.* (1991) definieron un margen de seguridad en curvas horizontales como la diferencia entre el factor de fricción de diseño y el percentil 85 de la fricción demandada. Demostraron que, al aumentar esta brecha, también aumentan las tasas de accidentes por deslizamiento. Sobre esa base, establecieron tres niveles de consistencia del margen de seguridad: bueno, aceptable y pobre.

Wong y Nicholson (1992) sostuvieron que la percepción de riesgo del conductor no puede identificarse directamente ni inferirse únicamente a partir de cambios en la velocidad de operación. Si bien la velocidad está influenciada por el riesgo percibido, también depende de factores geométricos y funcionales de la vía, como el radio, el peralte y la resistencia al deslizamiento del pavimento. En este contexto, el criterio más adecuado para evaluar la seguridad en curvas horizontales es un MOS objetivo, definido como la diferencia entre la fricción lateral disponible y la fricción lateral demandada por el sistema conductor – vehículo.

Morrall y Talarico (1994) definieron el MOS como la diferencia entre la fricción de deslizamiento y la fricción máxima demandada, donde la fricción de deslizamiento corresponde a la fricción del pavimento, mientras que la fricción demandada se asocia a la aceleración lateral bajo condiciones normales de conducción. Los autores señalaron que el MOS varía según el estado del pavimento (seco, mojado o con hielo). Además, debido al pulido progresivo de la superficie, la fricción del pavimento disminuye con el tiempo, provocando una reducción del MOS y una variabilidad estacional que introduce incertidumbre adicional (Echaveguren y de Solminihac, 2011; Echaveguren et al., 2015).

Reymond *et al.* (2001) propusieron un MOS basado en la fricción lateral, con el fin de explicar por qué esta disminuye al aumentar la velocidad de operación. Según el modelo, los conductores eligen una fricción lateral menor que la máxima disponible antes del deslizamiento, manteniendo así un margen de seguridad definido por la diferencia entre ambos. Dicho margen está asociado a la incertidumbre del conductor sobre la percepción subjetiva del riesgo.

Donnell et al. (2016) analizaron distintos conceptos de fricción utilizados en el diseño de curvas horizontales y compararon los márgenes de fricción lateral para diferentes tipos de vehículos y velocidades de operación, utilizando curvas de oferta de fricción desarrolladas a partir de mediciones en terreno en carreteras rurales de dos y múltiples pistas. Los resultados mostraron que, en carreteras rurales con altas velocidades de diseño (mayores a 45 mph), los conductores circulan a velocidades cercanas a los factores máximos de fricción lateral establecidos por AASHTO (2001). En curvas con menores velocidades de diseño, la fricción demandada observada superó en varios casos los factores máximos de fricción lateral considerados en el diseño geométrico. Asimismo, se observó que, para automóviles, la fricción demandada se mantuvo generalmente al menos 0,05 por debajo de las curvas medias de oferta de fricción en carreteras de dos y múltiples pistas, salvo en condiciones de baja velocidad de diseño, donde los valores del percentil 90 de la fricción demandada coincidieron con la oferta media.

Vaiana et al. (2018) conceptualizaron el MOS desde una perspectiva conductual mediante el modelo de Klebelsberg, incorporando la percepción subjetiva de comodidad los conductores voluntarios con respecto al nivel de fricción lateral demandado. El déficit de seguridad se cuantificó a partir de un diagrama de seguridad objetivo–subjetivo.

Rahmani et al. (2025) propusieron un índice de nivel de seguridad para curvas basado en la aceleración lateral y el concepto de riesgo. El factor de severidad se definió en función de la aceleración lateral, un umbral crítico y el percentil 85 de la aceleración lateral. El índice de riesgo individual se obtuvo como el producto del factor de severidad y un factor de probabilidad, definido como la frecuencia empírica de excedencia de la aceleración lateral.

A medida que la fricción del pavimento disminuye con el tiempo debido al pulimento del pavimento, el margen de seguridad también disminuye y varía estacionalmente, lo que introduce aún más incertidumbre (Echaveguren y de Solminihac, 2011; Echaveguren *et al.*, 2015). En cuanto a la fricción de operación, esta presenta variabilidad, ya que depende de las condiciones específicas del entorno o socioculturales (Lamm *et al.*, 1991; Echaveguren y Sáez, 2001; Xu *et al.*, 2015; Jiménez, 2016).

Si bien los distintos enfoques revisados han permitido caracterizar el margen de seguridad en curvas horizontales, la mayoría de estas formulaciones se basa en valores deterministas de fricción lateral. No obstante, la evidencia empírica indica que tanto la fricción del pavimento como la fricción de operación presentan una variabilidad significativa, asociada al deterioro del pavimento, condiciones climáticas, estacionalidad y comportamiento del conductor.

2.6 Principios de confiabilidad

La confiabilidad se define como la capacidad de un sistema o componente para desempeñar sus funciones requeridas bajo condiciones establecidas durante un período de tiempo específico (Lewis, 1987; Kottegoda y Rosso, 1997). En términos matemáticos, corresponde al complemento de la probabilidad de falla.

Sea la función de desempeño del sistema $Z = G(x_1, x_2, \dots, x_N)$, donde $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ es un vector de N dimensiones que representa las variables de diseño. El incumplimiento o la falla en satisfacer los criterios de sistema se manifiesta a través de determinadas combinaciones de estas variables. El caso $Z < 0$ corresponde a una situación de la que la demanda excede la capacidad, mientras que el caso $Z > 0$ corresponde al desempeño conforme a lo previsto. El caso $Z = 0$ describe un estado límite entre el funcionamiento adecuado y la falla. Si $Z(X)$ es una función lineal, las variables aleatorias siguen una distribución de probabilidad normal y no están correlacionadas; por lo tanto, la probabilidad de falla (P_f) puede describirse de acuerdo con las Ecuaciones 2.5 y 2.6 (Haldar y Mahadevan, 2000).

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (2.5)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\sum a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum a_i^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (2.6)$$

Donde β es el índice de confiabilidad, μ_Z y σ_Z son la media y desviación estándar de la función $Z(X)$, a_i corresponde a las constantes determinísticas y μ_{X_i} y σ_{X_i} son la media y desviación estándar de las variables aleatorias X_i .

En el caso de que la función de desempeño no es lineal y las variables aleatorias no siguen distribuciones normales se emplea el método de Hasofer y Lind (1974), el cual define el índice de confiabilidad como la distancia mínima entre el origen del espacio normal estándar y la superficie de estado límite.

Para ello, las variables aleatorias originales se transforman a variables normalizadas no correlacionadas mediante la transformación de Rosenblatt (1952), obteniéndose el vector u , cuyo origen $u = 0$ representa el estado límite del sistema.

El índice de confiabilidad según Hasofer-Lind se define como:

$$\beta_{HL} = \min_{\{x \in Z(X) = 0\}} \sqrt{\sum_i u_i^2} \quad (2.7)$$

El punto que satisface esta condición se denomina punto de diseño u^* , y el vector direccional normalizado que describe la orientación de la superficie $Z(u) = 0$ en el punto de diseño se define como:

$$\alpha = \frac{\nabla Z(u^*)}{\|\nabla Z(u^*)\|} \quad (2.8)$$

donde ∇Z es el gradiente de la función de estado límite evaluado en el punto de diseño.

Finalmente, la probabilidad de falla es calculada con la Ecuación 2.9, en función del índice de confiabilidad obtenido.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_{HL}) \quad (2.9)$$

2.7 Aplicaciones de principios de confiabilidad en curvas horizontales

El estado-del-arte ofrece diversos ejemplos de aplicación de los principios de confiabilidad en el diseño geométrico de curvas horizontales. La mayor parte de la investigación realizada utiliza análisis de confiabilidad de primer orden (FORM) y simulación de Montecarlo, asumiendo distribuciones de probabilidad normal y funciones de estado límite lineales.

Navin (1990) fue el primero en introducir el concepto de estado límite en el diseño geométrico de curvas horizontales. Investigó la posibilidad de desarrollar medidas de seguridad para la distancia de detención, curvas horizontales, distancia de decisión, distancia de adelantamiento y curvas verticales. Mediante el uso de valores promedio y desviaciones estándar, estimó distribuciones de frecuencia y del margen de seguridad, enfocándose inicialmente en la distancia de detención.

Echaveguren *et al.* (2005) utilizaron un índice de confiabilidad usando FORM como medida del margen de seguridad con respecto a la fricción del pavimento y la fricción de diseño y evaluaron un caso de estudio para vehículos livianos. Identificaron como variables de alto impacto la macrotextura, la resistencia al deslizamiento y el radio de curvatura, mientras que el peralte mostró un efecto poco significativo.

Shin y Lee (2015) utilizaron FORM para estimar la probabilidad de deslizamiento y vuelco en rampas de salida e intercambios de autopistas. Sus resultados mostraron que la probabilidad de deslizamiento disminuye significativamente al aumentar el coeficiente de fricción lateral, mientras que el riesgo de vuelco se relaciona principalmente con la velocidad y el ángulo de deflexión.

Dhahir y Hassan (2016) propusieron funciones de estado límite para evaluar el deslizamiento (como la diferencia entre la fricción del pavimento y la fricción operativa) y la comodidad (diferencia entre la aceleración lateral y un umbral de confort). Utilizando la transformada de Nataf, generaron curvas de probabilidad de excedencia en función del radio de curvatura.

Cruz-Marabolí y Echaveguren (2019) desarrollaron un modelo analítico para estimar la probabilidad de vuelco en vehículos pesados, combinando FORM con funciones logísticas de tipo Gompertz. Determinaron que los radios mínimos establecidos por la normativa chilena, aunque efectivos para evitar el deslizamiento, no garantizan la prevención del vuelco en todos los casos.

En paralelo, otros autores han utilizado simulación de Montecarlo para incorporar la variabilidad de las condiciones operativas. El-Khoury y Hobeika (2007) evaluaron la distancia de adelantamiento considerando la variabilidad del tiempo de percepción y reacción, la tasa de desaceleración y las características físicas de los vehículos. Sarhan y Hassan (2008) aplicaron esta técnica al diseño de curvas horizontales combinadas con curvas verticales, mostrando cómo la pendiente, el radio y el peralte influyen en la visibilidad de parada disponible.

Se destaca que en el análisis de confiabilidad, el evento de falla no se refiere necesariamente a un colapso o evento catastrófico. Más bien, el término probabilidad de falla representa la probabilidad de que ocurra un evento no deseado que exceda cierto umbral. En el diseño vial, se ha propuesto el uso del término probabilidad de excedencia (Navin, 1991; Essa, 2016).

2.8 Conclusiones

Una extensión del enfoque tradicional de diseño en curvas horizontales corresponde al modelo de tres zonas, el cual integra la oferta de fricción del pavimento, la fricción de diseño y la fricción de operación en función de la velocidad. Las intersecciones de estas curvas con la demanda puntual de fricción, derivada del modelo de masa puntual, representan la condición de equilibrio entre velocidad y fricción para una curva geometría determinada.

De la literatura existente se desprende que la diferencia entre la fricción de operación y la fricción de diseño representa el margen de seguridad asociado a la comodidad de los conductores que transitan por una determinada curva horizontal. Cuando este margen disminuye, aumenta la probabilidad de que los usuarios experimenten incomodidad y adopten comportamientos de conducción que pueden comprometer la estabilidad del vehículo y la seguridad operacional.

Por tanto, resulta necesario analizar también el margen de seguridad entre la fricción de operación y la oferta de fricción, ya que representa el riesgo al deslizamiento cuando la demanda iguala o supera la capacidad disponible del pavimento.

Tradicionalmente, este margen ha sido abordado bajo un enfoque determinístico, utilizando valores únicos de fricción de diseño de acuerdo con la categoría de la vía. Sin embargo, los parámetros que explican los modelos de fricción son de naturaleza aleatoria.

En este sentido, no se ha desarrollado un modelo integrado que permita evaluar de manera probabilística el margen de seguridad entre ambas componentes bajo condiciones

operacionales reales, considerando simultáneamente la geometría de la vía, la degradación del pavimento y la variabilidad en la velocidad.

En este contexto, se introdujeron los principios de confiabilidad como marco conceptual adecuado para representar dicha variabilidad. La formulación mediante funciones de estado límite y el uso de índices de confiabilidad permiten cuantificar explícitamente la probabilidad de excedencia del deslizamiento, superando las limitaciones de los enfoques deterministas. La literatura revisada demuestra que la aplicación de métodos como FORM y simulación de Montecarlo constituye una herramienta consistente para integrar incertidumbre en el diseño geométrico de curvas horizontales.

CAPÍTULO 3 **PROBABILIDAD DE DESLIZAMIENTO**

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan las variables explicativas del modelo sus niveles y sus respectivas funciones de distribución de probabilidad. Luego, se genera la función de estado límite, con el objetivo de representar un margen de seguridad probabilístico de fricción lateral. Finalmente, se realizan simulaciones de probabilidad de deslizamiento, considerando las combinaciones factibles.

3.2 Variables explicativas

La identificación de las variables explicativas se realizó a partir de una revisión exhaustiva del estado del arte, en atención a su relevancia en la modelación del fenómeno analizado. De dicha revisión se concluyó que las variables explicativas pueden agruparse en dos categorías: variables geométricas y variables de operación.

Las variables probabilistas consideradas corresponden al radio de curvatura, la macrotextura del pavimento y su resistencia al deslizamiento, y la velocidad de operación del centro de la curva.

Los rangos para cada una de las variables fueron definidos de la siguiente manera:

- La caracterización probabilística de la resistencia al deslizamiento (RD) y de la textura del pavimento se realizó siguiendo el procedimiento metodológico propuesto por Echaveguren et al. (2005), el cual se basa en el análisis estadístico de bases de datos obtenidas en Chile. En dicho estudio se reportaron valores de macrotextura comprendidos entre 0,5 y 1,1 mm, los cuales fueron medidos mediante perfilómetro láser. Asimismo, la resistencia al deslizamiento presentó valores entre 0,4 y 1,0, obtenidos a partir de mediciones realizadas con el equipo SCRIM (UK).

Adicionalmente, se observó que ambas variables presentaban, de manera predominante, una distribución normal.

- En relación con el radio de curvatura, el Volumen 3 del Manual de Carreteras, en su Numeral 3.203.3, establece que el radio mínimo para curvas horizontales asociadas a una velocidad de proyecto de 50 km/h es de 80 m, valor que se adopta como cota inferior. Por su parte, la cota superior del radio geométrico se fija en 1000 m, con base en simulaciones preliminares que evidenciaron probabilidades de deslizamiento eran prácticamente nulas sobre dicho valor.
- Se consideran velocidades de operación en el centro de la curva comprendidas entre 50 y 90 km/h.

La Tabla 3.1 resume las variables explicativas del modelo probabilista del margen de seguridad de la fricción lateral y sus respectivos niveles y rangos de variación.

Tabla 3.1 Niveles y rangos de las variables explicativas del modelo.

Variable	Tipo	Niveles	Rango de variación
Velocidad de operación en el centro de la curva ($V_{85_{MC}}$, en km/h)	Probabilista	3	50 – 90
Radio (R, en m)	Probabilista	6	80 – 1000
Resistencia al deslizamiento (RD)	Probabilista	3	0,4 – 1,0
Macrotextura del pavimento (T_x , en mm)	Probabilista	3	0,5 – 1,1
Velocidad de medición (S, en km/h)	Determinista	-	
Parámetros de calibración (A; B; a; b)	Determinista	-	

Para estimar el margen de seguridad probabilístico (PMOS), se requiere modelos de velocidad – geometría y de aceleración lateral – geometría. Los modelos de velocidad – geometría utilizados en este estudio fueron propuestos por Echaveguren et al. (2015), mientras que los modelos de aceleración lateral – geometría fueron calibrados en esta investigación.

3.3 Función de estado límite

De acuerdo con el modelo de tres zonas propuesto por de Solminihac *et al.* (2007), la función de estado límite presentada en la Ecuación 3.1 representa un margen de seguridad definido a partir de la fricción del pavimento (f_{pav}) y la fricción de operación (f_{op}), las cuales corresponden, respectivamente, a la oferta y demanda de fricción. Cuando $Z > 0$, se cumple que $f_{pav} > f_{op}$, lo que indica que los vehículos que circulan por la curva horizontal no experimentan deslizamiento.

$$Z = f_{pav} - f_{op} \quad (3.1)$$

La fricción del pavimento fue estimada mediante el Índice Internacional de Fricción (*International Friction Index*, IFI) desarrollada por Wambold *et al.* (1995), mientras que la fricción de operación fue calculada utilizando los modelos de aceleración lateral desarrolladas por Jiménez (2016). La formulación del IFI se presenta en la Ecuación 3.2. En esta investigación, RD corresponde a la resistencia al deslizamiento medida con un dispositivo específico, caracterizado por los parámetros de calibración A y B. Los parámetros a y b están asociados al perfilómetro utilizado para medir la macrotextura del pavimento (T_x , en mm). Finalmente, S_c representa la velocidad de deslizamiento (km/h).

$$IFI = \left(A + B \cdot \left(RD \cdot e^{\frac{S_c - 60}{a + b \cdot T_x}} \right) \right) \cdot e^{\frac{60 - S}{a + b \cdot T_x}} \quad (3.2)$$

Al combinar las Ecuaciones 3.1 y 3.2 se obtiene la función Z definida en la Ecuación 3.3. El miembro izquierdo de la Ecuación 3.3) representa el modelo de oferta de la fricción basado en el IFI (derivado de la Ecuación 3.2)), mientras que el miembro derecho corresponde al modelo de aceleración lateral propuesto por Jiménez (2016), transformado a fricción lateral mediante la relación $f = a/g$. En la Ecuación 3.3), R es el radio de la curva horizontal (m), y C es una variable binaria que representa el signo de la curvatura ($C = 0$ si es hacia la derecha;

C = 1 si es hacia la izquierda), V_{85MC} corresponde a la velocidad de operación en el punto medio de la curvatura (km/h), la cual depende de la velocidad de operación de aproximación. Las variables aleatorias consideradas en la función Z son la resistencia al deslizamiento (RD), la macrotextura (T_x), el radio de la curva (R) y la velocidad de operación (V_{85MC}).

$$Z = \left(A + B \left(RD \cdot e^{\frac{S_c - 60}{a + b \cdot T_x}} \right) \right) e^{\frac{60 - S}{a + b \cdot T_x}} - \frac{\left(\left(\frac{322.29}{R} + 9.278 \times 10^{-5} \cdot V_{85MC}^2 + 0.513 \cdot C \right)^2 \cdot 0.972 + 1 \right)^{1.016}}{g} \quad (3.3)$$

3.4 Datos de entrada

Las funciones de densidad de probabilidad de RD y T_x se estimaron a partir de una base de datos generada por la Dirección de Vialidad de Chile. Los datos fueron clasificados en tres niveles de RD y T_x . Dado que ambos tipos de información fueron obtenidos simultáneamente en cada tramo de ensayo, se identificaron combinaciones factibles de RD y T_x . Los resultados se presentan en la Tabla 3.2. El mejor ajuste obtenido correspondió a una función de densidad de probabilidad normal, $N_{T_x}(\mu, \sigma)$ y $N_{RD}(\mu, \sigma)$.

Tabla 3.2 Funciones de densidad de probabilidad de la macrotextura y de la resistencia al deslizamiento.

Resistencia al deslizamiento	Textura (mm)		
	Alta	Media	Baja
Alta	$N_{T_x}(1,1; 0,275)$ $N_{RD}(1,0; 0,25)$	$N_{T_x}(0,8; 0,20)$ $N_{RD}(1,0; 0,25)$	No es factible
Media	$N_{T_x}(1,1; 0,275)$ $N_{RD}(0,8; 0,20)$	$N_{T_x}(0,8; 0,20)$ $N_{RD}(0,8; 0,20)$	$N_{T_x}(0,5; 0,125)$ $N_{RD}(0,8; 0,20)$
Baja	No es factible	$N_{T_x}(0,8; 0,20)$ $N_{RD}(0,4; 0,10)$	$N_{T_x}(0,5; 0,125)$ $N_{RD}(0,4; 0,10)$

Los parámetros A y B se obtuvieron de Wambold et al. (1995), considerando el dispositivo SCRIM, el cual es utilizado por la Dirección de Vialidad de Chile para la medición de la resistencia al deslizamiento (A = 0.03258; B = 0.87170). Por su parte, los parámetros a y

b se obtuvieron de Wambold et al. (1995) para un perfilómetro láser clase I, utilizado en Chile para la medición de la macrotextura del pavimento ($a = 25,8322$ km/h; $b = 139,68$ km/h-mm).

Los valores de $V_{85_{MC}}$ se obtuvieron mediante simulaciones de Montecarlo. Considerando una función de densidad de probabilidad uniforme para velocidades de aproximación de 50, 70 y 90 km/h, con un rango de variación de ± 20 km/h, se obtuvieron funciones de densidad de probabilidad normales para $V_{85_{MC}}$. Las funciones de densidad de probabilidad del radio se obtuvieron de de Solminihac et al. (2007). Los resultados se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.3 Funciones de densidad de probabilidad del radio y la velocidad de operación en el punto medio de la curva.

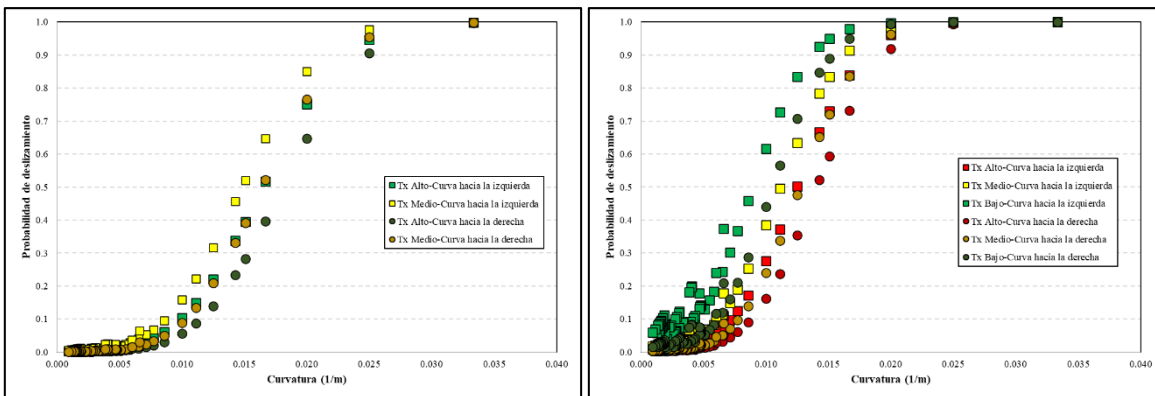
Radio (m)	Velocidad de aproximación a tangente de entrada (km/h)		
	Re(40; 60)	Re(60; 80)	Re(80; 100)
N(180; 50)	N(79,81; 4,62)	N(89,46; 4,62)	N(99,12; 4,62)
N(225; 65)	N(82,51; 4,93)	N(92,20; 4,93)	N(101,85; 4,93)
N(300; 85)	N(86,27; 5,14)	N(95,94; 5,14)	N(105,59; 5,14)
N(425; 120)	N(91,28; 5,41)	N(100,92; 5,41)	N(110,58; 5,41)
N(550; 150)	N(95,25; 5,47)	N(104,91; 5,47)	N(114,57; 5,47)
N(650; 180)	N(97,91; 5,74)	N(107,58; 5,74)	N(117,24; 5,74)

3.5 Modelación de curvas de probabilidad

Las probabilidades de falla o deslizamiento que representan los diversos puntos de las Figuras 3.1 y 3.2 se calcularon utilizando el *software* Rt (Mahsuli y Haukaas, 2013), el cual incluye algoritmos para análisis de confiabilidad estructural de primer y segundo orden. En esta investigación se empleó el método FORM (First-Order Reliability Method), implementado en Rt mediante el algoritmo de Hasofer–Lind para linealizar la función de estado límite y usando la transformación de Nataf para la transformación de variables no normales (Hasofer y Lind, 1974; Nataf, 1962).

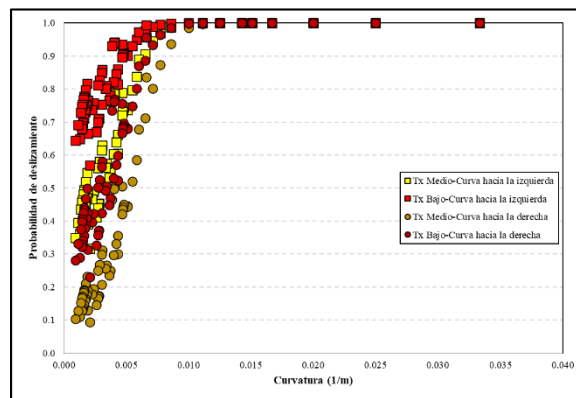
Las simulaciones se realizaron para la función de estado límite presentada en la Ecuación 3.3, definida como la diferencia entre la oferta y demanda de fricción lateral en una curva horizontal, utilizando como entrada las distribuciones de probabilidad de las diversas variables geométricas, del pavimento y de operación. En cada una de las simulaciones se ingresaron las distribuciones de las variables en forma manual.

Las resumen los resultados obtenidos para velocidades de operación de la tangente de entrada a la curva altas y bajas, respectivamente. El eje horizontal representa a la curvatura ($1/R$, en $1/m$), mientras que el eje vertical corresponde a la probabilidad de deslizamiento.



a) Resistencia al deslizamiento alta.

b) Resistencia al deslizamiento media.

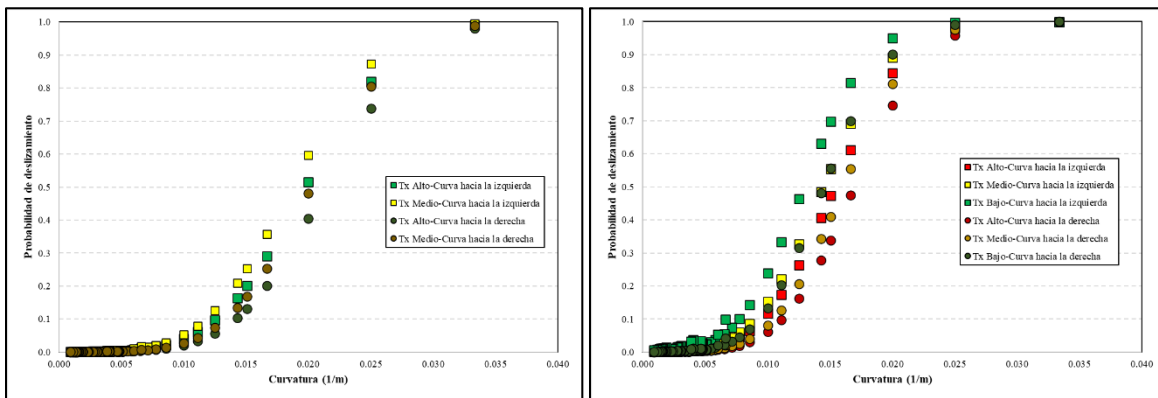


c) Resistencia al deslizamiento baja.

Figura 3.1 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva alta.

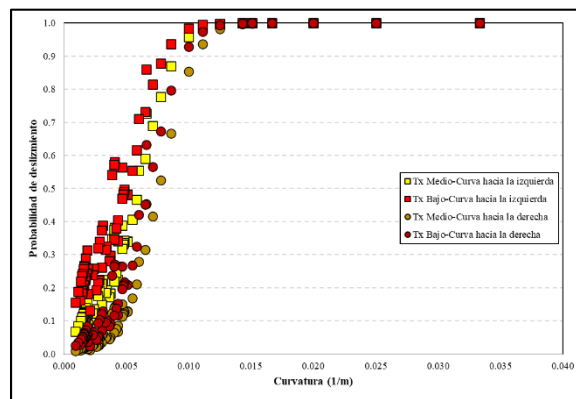
Los resultados presentados en la Figura 3.1 indican que la probabilidad de deslizamiento (PMOS) en pavimentos con baja resistencia al deslizamiento presenta un comportamiento prácticamente determinista, independiente de la macrotextura. En contraste, a medida que aumenta la resistencia al deslizamiento, también se incrementa la variabilidad del PMOS, y el efecto de la macrotextura se vuelve relevante.

Esto implica que, si bien las mejoras en la macrotextura pueden contribuir a incrementar la seguridad bajo condiciones marginales, estas no pueden sustituir una adecuada resistencia básica al deslizamiento. Por lo tanto, los protocolos de conservación deberían priorizar la restitución de los niveles bases de fricción antes de abordar intervenciones asociadas a la macrotextura, especialmente en zonas de alta curvatura.



a) Resistencia al deslizamiento alta.

b) Resistencia al deslizamiento media.

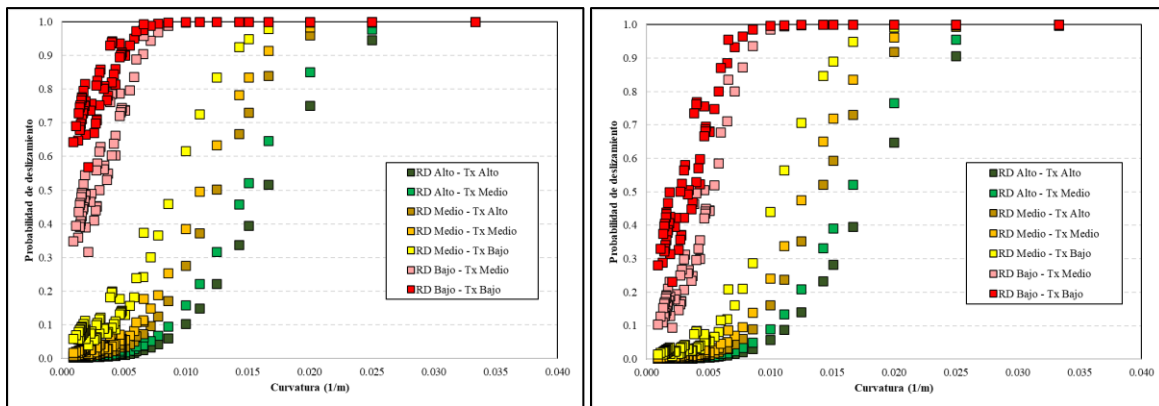


c) Resistencia al deslizamiento baja.

Figura 3.2 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva baja.

Para pavimentos con alta resistencia al deslizamiento, se observó que la probabilidad de falla asociada a las distintas texturas y velocidades de operación es nula para radios superiores a 100 m. En contraste, cuando la resistencia al deslizamiento es baja, la probabilidad de falla es mayor a cero para todos los valores de radio de curvatura.

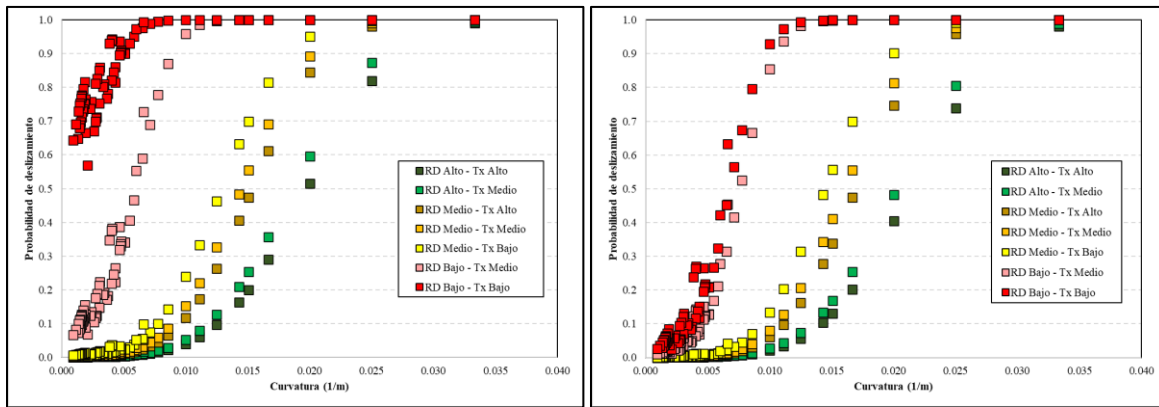
Las Figuras 3.3a y 3.4a (curvas con dirección hacia la izquierda) muestran que la probabilidad de falla en pavimentos con resistencia al deslizamiento de nivel alto es elevada para radios menores a 40 m, cayendo a 0,5 con radios entre 55 y 75 m. En pavimentos con resistencia al deslizamiento baja la probabilidad de falla de 0,5 se alcanza con radios sobre los 500 m.



a) Curva con dirección hacia la izquierda.

b) Curva con dirección hacia la derecha.

Figura 3.3 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva alta por sentido de la dirección de la curva.



a) Curva con dirección hacia la izquierda.

b) Curva con dirección hacia la derecha.

Figura 3.4 Probabilidad de deslizamiento para una velocidad de operación de la tangente de entrada a la curva baja por sentido de la dirección de la curva.

En las Figuras 3.3b y 3.4b (curvas con dirección hacia la derecha) se aprecia que la probabilidad de deslizamiento en pavimentos con resistencia al deslizamiento baja es cercana a 1 para radios menores a 130 m para velocidades de operación altas, menores a 90 m para velocidades de operación bajas.

3.6 Conclusiones

De los resultados presentados correspondientes a la probabilidad de deslizamiento para una alta velocidad de operación en la tangente de entrada a la curva, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Niveles bajos de resistencia al deslizamiento (RD) provocan un aumento drástico e inmediato en la probabilidad de deslizamiento, incluso en curvas horizontales con radios geométricos altos.
- Una menor macrotextura (Tx) se correlaciona consistentemente con un mayor riesgo de deslizamiento en todos los niveles de RD.

La combinación de baja RD y baja Tx configura un estado crítico de falla, en el cual el deslizamiento se vuelve prácticamente seguro (probabilidad de

deslizamiento = 1,0) en curvas horizontales de reducido radio geométrico. En términos prácticos, cuando el radio es inferior a 200 metros, la probabilidad de deslizamiento supera el 0,5

- Altas velocidades de entrada comprimen significativamente el margen de seguridad, produciendo una rápida saturación del riesgo a medida que aumenta la curvatura.

De los resultados presentados correspondientes a la probabilidad de deslizamiento para una baja velocidad de operación en la tangente de entrada a la curva, se desprenden las siguientes conclusiones:

- Una alta resistencia al deslizamiento influye enormemente al margen de seguridad, manteniendo una baja probabilidad de deslizamiento en un rango más amplio de curvaturas.
- En segundo plano, la macrotextura también influye al margen de seguridad. Una Tx alto retrasa eficazmente el inicio del deslizamiento cuando la RD disminuye de nivel alto a medio.
- Velocidades más bajas permiten un incremento más gradual de la probabilidad de deslizamiento, proporcionando un mayor margen de seguridad relativamente con respecto a velocidades altas.

Asimismo, se identificó una diferencia sistemática asociada al sentido de la curva. Las curvas hacia la izquierda resultaron más críticas bajo velocidades de operación altas, registrando mayores probabilidades de deslizamiento para un mismo radio de curvatura. En consecuencia, el análisis de una curva horizontal en una carretera bidireccional debe estar gobernado por la condición más desfavorable, es decir, para aquellos que giran hacia la izquierda.

CAPÍTULO 4 MODELO DE MARGEN DE SEGURIDAD PROBABILÍSTICO

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la parametrización de las curvas de probabilidad de para cada combinación de variables físicas y operativas, realizando previamente un ajuste de funciones sigmoideas sobre los datos simulados. Finalmente, se presentan ejemplos de aplicación de las curvas de probabilidad relacionados con el cálculo de radios mínimos y de límites de velocidad.

4.2 Ajuste de funciones a los datos simulados

Una vez realizadas las simulaciones, se ajustaron diversas funciones de crecimiento sigmoideal a los datos simulados, con el objetivo de identificar aquella que presentara el mejor ajuste estadístico, definido en este caso como el menor error cuadrático medio (MSE). Para este procedimiento se utilizó el software MINITAB 17 (Minitab Inc., 2014), el cual dispone de un catálogo de seis funciones sigmoideas.

Para la parametrización de la curva de probabilidad se analizaron seis curvas sigmoideas de crecimiento. Los parámetros de cada modelo, junto con el correspondiente error cuadrático medio (MSE), se obtuvieron mediante el ajuste de la curva de probabilidad de falla en función del radio de curvatura. En la Tabla 4.1 se presentan las especificaciones matemáticas de cada modelo y los rangos de valores de MSE obtenidos. En todos los modelos se consideró la variable independiente como $x = 1/\text{radio}$.

Tabla 4.1 Modelos analíticos del margen de seguridad probabilista.

Modelo	Margen de seguridad probabilista (PMOS)	Error cuadrático medio (MSE)
Crecimiento de Gompertz	$PMOS = \phi_1 e^{-e^{(\phi_2 - \phi_3 x)}}$	0,013998 – 0,111522
Crecimiento Log-logístico	$PMOS = \phi_1 + \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{(1 + e^{(\phi_4 \ln(\frac{x}{\phi_3}))})}$	0,000025 – 0,004256
Crecimiento Logístico	$PMOS = \phi_1 + \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{1 + e^{\frac{(x - \phi_3)}{\phi_4}}}$	0,000009 – 0,004158
Sigmoide de 1 parámetro Tipo I	$PMOS = 1 - e^{(-x^{\phi_2})}$	0,027724 – 0,218491
Sigmoide de 2 parámetros Tipo I	$PMOS = 1 - e^{(-\phi_1 x^{\phi_2})}$	0,000125 – 0,004366
Sigmoide de 2 parámetros Tipo II	$PMOS = 1 - e^{(-e^{(\phi_1 - \phi_2 x)})}$	0,000004 – 0,218491

La calibración del modelo incluyó tres niveles de velocidad de operación de tangente de entrada, macrotextura y resistencia al deslizamiento, así como curvas hacia la izquierda y hacia la derecha. Los resultados muestran que el modelo más estable y coherente fue el modelo de Crecimiento Logístico, considerando que las probabilidades en las colas superior e inferior se mantuvieron por debajo de 1,0 y por sobre 0, respectivamente. Adicionalmente, este modelo presentó los valores más bajos de error cuadrático medio (MSE).

4.3 Parametrización del modelo de margen de seguridad probabilístico

Se probaron especificaciones funcionales de los parámetros ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 y ϕ_4 utilizando regresión lineal simple, considerando interacciones de hasta segundo grado (excluyendo al sentido de la curva de las interacciones). De estas especificaciones, se seleccionaron las más robustas.

Tabla 4.2 Correlación entre la resistencia al deslizamiento, la velocidad y la macrotextura, y los parámetros del modelo logístico del PMOS.

Parámetro	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	R^2
$\phi_1 = \alpha_1 + \alpha_2 RD + \alpha_3 RD^2$	+1,0112 (642,38)	-0,0239 (-4,66)	+0,0129 (-3,50)	-	-	0,72
$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 RD + \alpha_3 RD V_{op}$ + $\alpha_4 V_{op}$ + $\alpha_5 C$	-0,4995 (-2,52)	+0,0575 (2,26)	-0,0135 (-3,82)	-0,0123 (4,47)	-0,0629 (-2,53)	0,61
$\phi_3 = \alpha_1 RD + \alpha_2 T_x + \alpha_3 V_{op}$ + $\alpha_4 C$	+0,0019 (53,99)	+0,0045 (12,71)	-0,0001 (-17,25)	+0,0015 (10,29)	-	0,99
$\phi_4 = \alpha_1 + \alpha_2 RD + \alpha_3 T_x$ + $\alpha_4 V_{op}$	+0,0004 (6,65)	+0,0027 (58,13)	+0,0005 (10,98)	$-6,42 \times 10^{-6}$ (-11,22)	-	0,99

La Tabla 4.2 presenta los resultados obtenidos para la función de estado límite, estos muestran una correlación significativa, obteniéndose un modelo que explica el PMOS a partir de parámetros geométricos, operativos y del pavimento.

El modelo parametrizado permite estimar directamente la probabilidad de falla asociada al deslizamiento utilizando como datos de entrada el radio de la curva horizontal, la velocidad de operación en el centro de la curva, la textura del pavimento, la resistencia al deslizamiento y la dirección del sentido de la curva. Estas variables son comúnmente consideradas en el diseño geométrico vial. En consecuencia, el modelo obtenido constituye una herramienta de fácil aplicación para los ingenieros durante el proceso de diseño.

4.4 Aplicaciones del margen de seguridad probabilístico

El modelo analítico del margen de seguridad probabilístico (PMOS) obtenido permite a los ingenieros estimar la probabilidad de deslizamiento en función de la geometría vial, las propiedades funcionales del pavimento y las condiciones de operación. Adicionalmente, posibilita la estimación del radio mínimo de diseño y de la velocidad reglamentaria.

El radio mínimo de diseño fue estimado para distintos valores de resistencia al deslizamiento y macrotextura mediante el modelo analítico de PMOS, en función de un PMOS objetivo. Las Tabla 4.3 y Tabla 4.4 presentan los radios mínimos de diseño obtenidos para niveles de PMOS permisivo, conservador y riguroso (75%, 50% y 20%, respectivamente), sólo se considera el sentido de curva hacia la izquierda, debido a que corresponde al caso más desfavorable. Las celdas sombreadas corresponden a radios superiores al radio mínimo de diseño.

Ante un incremento de la probabilidad de deslizamiento desde 50 % hasta 75 %, se observa una variación en los radios mínimos comprendida entre 9 y 28 m cuando la velocidad de operación en la tangente de entrada es 50 km/h, y entre 12 y 130 m cuando dicha velocidad es 90 km/h. Así, para ambos niveles de textura y los tres niveles de resistencia al deslizamiento analizados, la probabilidad de deslizamiento presenta una alta sensibilidad frente a pequeñas variaciones en el radio de la curva.

Para una velocidad de operación en la tangente de entrada de 50 km/h y un PMOS de 50 %, el radio mínimo necesario para evitar el deslizamiento supera el radio mínimo asociado a una velocidad de proyecto de 50 km/h definido en el Volumen 3 del Manual de Carreteras (MOP, 2024). Esta condición se presenta cuando la resistencia al deslizamiento es 0,70 con macrotextura menor o igual a 0,6 mm, y cuando la resistencia es 0,45 con macrotextura menor o igual a 1,0 mm.

En el caso de una velocidad de operación de 90 km/h, los radios mínimos obtenidos a partir del PMOS resultan compatibles con el criterio normativo para la velocidad de proyecto correspondiente. Solo se identifica una discrepancia en el escenario más desfavorable, cuando el PMOS es 20 %, la resistencia al deslizamiento es 0,45 y la macrotextura es menor o igual a 1,0 mm, situación en la cual el radio exigido por un vehículo para mantener la estabilidad dinámica supera el valor normativo de referencia.

Tabla 4.3 Radios mínimos para una velocidad de operación de la tangente de entrada de 50 km/h en distintos niveles de PMOS.

PMOS	Radio mínimo de diseño modelado (m)						Radio Mínimo MOP (2024) (m)
	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	
	RD = 0.45		RD = 0.70		RD = 0.90		
0,20	217	166	118	100	85	75	80
0,50	138	111	83	73	63	57	
0,75	110	90	69	60	53	48	

Tabla 4.4 Radios mínimos para una velocidad de operación de la tangente de entrada de 90 km/h en distintos niveles de PMOS.

PMOS	Radio mínimo de diseño modelado (m)						Radio Mínimo MOP (2024) (m)
	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	
	RD = 0.45		RD = 0.70		RD = 0.90		
0,20	No es factible	330	161	131	111	95	330
0,50	322	212	119	98	78	68	
0,75	192	140	91	77	64	56	

En la Tabla 4.5 se presenta la velocidad de operación límite en el centro de la curva para un PMOS de 50 %, estimada mediante el modelo de margen de seguridad probabilístico y considerando como dato de entrada los radios mínimos establecidos en el Volumen 3 del Manual de Carreteras (MOP, 2024).

Los resultados muestran que, para radios de 180 m y 330 m, correspondientes a velocidades de proyecto de 70 km/h y 90 km/h, respectivamente, la velocidad de operación límite supera los 120 km/h cuando la resistencia al deslizamiento es mayor o igual a 0,70. Esto indica que, bajo condiciones medias y altas de fricción, los radios mínimos normativos proporcionan un margen amplio frente al deslizamiento.

Tabla 4.5 Velocidad de operación en el centro de la curva límite para evitar el deslizamiento para un PMOS de 0,5.

Velocidad de proyecto (km/h)	Radio mínimo MOP (2024) (m)	Velocidad de operación límite (km/h)					
		RD = 0,45		RD = 0,70		RD = 0,90	
		Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm	Tx = 0,6 mm	Tx = 1,0 mm
50	80	No es factible	No es factible	44	64	94	118
70	180	67	83	>120	>120	>120	>120
90	330	91	102	>120	>120	>120	>120

4.5 Conclusiones

El modelo parametrizado permite estimar directamente la probabilidad de falla asociada al deslizamiento a partir del radio de la curva horizontal, la velocidad de operación, la macrotextura, la resistencia al deslizamiento y el sentido de la curva. Dado que estas variables forman parte habitual del proceso de diseño geométrico vial, el modelo propuesto constituye una herramienta práctica y de fácil aplicación para la evaluación probabilística de la seguridad en curvas horizontales, tanto en curvas existentes para determinar la velocidad límite reglamentaria particular, como en la fase de diseño para definir el radio mínimo requerido.

La calibración del modelo de margen de seguridad probabilístico incluyó tres niveles de velocidad de operación, macrotextura, resistencia al deslizamiento y el sentido de la curva

(izquierda y derecha). Los resultados indican que el modelo más estable y coherente fue el Modelo Logístico, ya que las probabilidades estimadas se mantuvieron dentro del rango teórico (mayores que 0 y menores que 1), y presentó además los valores más bajos de error cuadrático medio.

Se observa que, para superficies de pavimento de alta calidad, es decir, cuando la resistencia al deslizamiento es mayor o igual a 0,7, la velocidad límite asociada a un margen de seguridad probabilístico de 0,5 tiende a superar la velocidad de proyecto. Esto sugiere que, en condiciones favorables de fricción y textura, el diseño geométrico normativo presenta márgenes adecuados frente al deslizamiento.

En términos comparativos, los radios mínimos establecidos por la normativa muestran un desempeño adecuado en escenarios con resistencia media y alta, especialmente para velocidades de proyecto de 70 y 90 km/h, donde los márgenes de seguridad frente al deslizamiento son amplios. No obstante, bajo combinaciones desfavorables de resistencia al deslizamiento y macrotextura, el modelo probabilístico evidencia que el radio requerido para mantener la estabilidad dinámica de los vehículos puede exceder el valor normativo.

Asimismo, la combinación de velocidades de operación elevadas y baja resistencia al deslizamiento genera escenarios en los cuales el diseño resulta técnicamente no factible. En tales casos, el radio de la curva y/o las condiciones superficiales del pavimento son insuficientes para garantizar un margen de seguridad adecuado, debido a que la demanda de fricción supera la oferta disponible.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

El propósito principal de esta investigación fue determinar el efecto de la geometría vial, la condición del pavimento y la velocidad de operación en la probabilidad de deslizamiento de vehículos livianos en curvas horizontales de caminos rurales bidireccionales, incorporando principios de confiabilidad para considerar la variabilidad inherente de los parámetros que explican este fenómeno.

Se obtuvieron valores de probabilidad de deslizamiento para distintos escenarios que involucraban niveles de velocidad de operación, radios de curvatura, macrotextura del pavimento y resistencia al deslizamiento. A partir de estos resultados se desarrollaron expresiones analíticas que utilizan dichas variables como datos de entrada, facilitando su aplicación práctica tanto en la etapa de diseño como en la evaluación de infraestructura existente.

El trabajo genera un aporte en la incorporación explícita de la variabilidad e incertidumbre al análisis del deslizamiento en curvas horizontales, trasladando un problema tradicionalmente abordado de manera determinística hacia un enfoque probabilístico basado en principios de confiabilidad. En particular, se propone un margen de seguridad probabilístico para caminos rurales bidireccionales que integra la variabilidad de la fricción lateral y de la resistencia al deslizamiento del pavimento, constituyéndose en una herramienta alternativa para la evaluación del riesgo de deslizamiento en el diseño y la revisión geométrica.

Asimismo, el estudio contribuye al diseño geométrico vial, ya que la incorporación de principios de confiabilidad permite extrapolar los resultados al ámbito del diseño. En particular, es posible caracterizar distintos tipos de usuarios según variables operativas como la velocidad o la demanda de fricción, considerar diversas geometrías dentro de los rangos establecidos por las normativas vigentes e incorporar la variabilidad de las propiedades superficiales del pavimento. Esto no era factible con los márgenes de seguridad existentes, los cuales se basaban en una velocidad específica asociada a una geometría determinada.

En coherencia con lo señalado en la literatura, los márgenes de seguridad en curvas horizontales se han asociado tradicionalmente a la comodidad de conducción, representada por la diferencia entre la fricción de operación y la fricción de diseño. No obstante, cuando este margen se reduce, aumenta la probabilidad de que los usuarios experimenten incomodidad y adopten comportamientos que pueden comprometer la estabilidad del vehículo. En este contexto, el presente estudio amplía dicha perspectiva al analizar el margen de seguridad a partir de la relación entre la fricción de operación y la oferta efectiva de fricción del pavimento, enfocándose directamente en la condición que determina el riesgo de deslizamiento.

Se presenta una metodología robusta para la aplicación de principios de confiabilidad en el diseño geométrico vial. Los principales hallazgos que respaldan esta metodología son los siguientes:

- Tanto la fricción de operación como su dispersión estadística disminuyen a medida que aumenta el radio de la curva, lo que confirma que las curvas más cerradas están asociadas a una mayor variabilidad y riesgo de deslizamiento.
- Se calibró exitosamente un modelo logístico de margen de seguridad probabilístico capaz de estimar la probabilidad de deslizamiento a partir de tres variables de entrada: radio de la curva, velocidad de operación y la macrotextura del pavimento.

A partir del uso de datos empíricos de conducción para calibrar un modelo probabilístico, se propone un método matemático que permite calcular la probabilidad de excedencia de la demanda de fricción lateral. Esto posibilita que los ingenieros transiten desde un enfoque binario de diseño “seguro/inseguro” hacia un enfoque de gestión sustentado en niveles explícitos de confiabilidad.

En base a los resultados obtenidos, en los pavimentos con baja resistencia al deslizamiento, la probabilidad de falla se mantiene elevada incluso para radios de curvatura grandes. Para velocidades de operación altas, la probabilidad de deslizamiento se aproxima a uno en radios

inferiores a 130 m en curvas hacia la derecha y solo comienza a disminuir de forma apreciable para radios superiores a 400–500 m. Este comportamiento sugiere que, bajo condiciones de baja resistencia al deslizamiento, el fenómeno tiende a un régimen cuasi determinista, en el cual la variabilidad de la macrotextura ejerce una influencia limitada sobre el resultado final.

El nivel de ajuste de los modelos desarrollados y a la significancia estadística de sus variables, se verificó la hipótesis de que la probabilidad de que un vehículo experimente deslizamiento mientras circula por una curva horizontal depende de las características del pavimento, de la velocidad de operación y del radio geométrico.

Para cualquier radio de curvatura, a una misma velocidad y características del pavimento, la probabilidad de experimentar deslizamiento en una curva con sentido hacia la izquierda es mayor que hacia la derecha. Esto implica que los modelos de deslizamiento hacia la izquierda son los que limitan el comportamiento en curvas horizontales. En consecuencia, el análisis de una curva horizontal en una carretera bidireccional debe estar gobernado por la condición más desfavorable, es decir, para aquellos que giran hacia la izquierda.

Las curvas horizontales con pavimentos cuya resistencia al deslizamiento sea inferior a 0,7 no resultan recomendables, dado que, para el rango de velocidades de operación considerado en este estudio, el radio mínimo requerido para una probabilidad de deslizamiento de 0,5 puede superar el radio mínimo establecido en el Manual de Carreteras de Chile.

Los radios mínimos normativos se comportan adecuadamente en escenarios con resistencia media y alta, especialmente para velocidades de 70 y 90 km/h, donde los márgenes frente al deslizamiento son amplios. No obstante, bajo combinaciones desfavorables de fricción y textura, el modelo probabilístico muestra que el radio exigido para mantener la estabilidad puede superar el valor normativo, lo que sugiere que la suficiencia del criterio actual está condicionada a la calidad superficial efectiva del pavimento.

Como líneas futuras de investigación, se propone extender el modelo hacia la estimación probabilística del *rollover*, incorporando el comportamiento de vehículos pesados, cuya

mayor altura del centro de gravedad y dinámica de suspensión pueden generar demandas laterales distintas a las de vehículos livianos. Asimismo, resulta pertinente ampliar el análisis al caso de lazos y ramales de enlaces viales, donde las condiciones geométricas y operacionales presentan mayores exigencias.

Adicionalmente, se recomienda calibrar los modelos desarrollados con datos obtenidos directamente en terreno, por ejemplo, mediante sensores. Finalmente, la incorporación explícita de variables climáticas, como condiciones de pavimento mojado o presencia de hielo, permitiría mejorar la capacidad predictiva del modelo bajo escenarios ambientales adversos y avanzar hacia una evaluación más integral del riesgo.

REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2001). **Guidelines for geometric design of very low-volume local roads (ADT \leq 400)**. Washington, D.C., Estados Unidos.

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2004). **A policy on geometric design of highways and streets**. Washington, D.C., Estados Unidos.

Bonneson, J. (1999). Side friction and speed as controls for horizontal curve design. **Journal of Transportation engineering**, **125(6)**, 473-480. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:6\(473\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:6(473))

Bonneson, J. (2000). Superelevation distribution methods and transition designs. National Cooperative Highway Research Program Report 439, **Transportation Research Board**, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos.

Bonneson, J. (2001). Controls for horizontal curve design. **Transportation Research Record**, **1751**, 82–89. <https://doi.org/10.3141/1751-10>

Chowdhury, M., Warren, D., y Bissell, H. (1991). Analysis of advisory speed setting criteria. **Public Roads**, **55(3)**, 65–71.

Cruz, P., Echaveguren, T., y González, P. (2017). Estimación del potencial de rollover de vehículos pesados usando principios de confiabilidad. **Revista Ingeniería de Construcción**, **32(1)**, 5-14. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100001>

Cruz-Marabolí, P., y Echaveguren, T. (2019). Reliability-based estimation of heavy vehicle rollover probability on two-lane highways. **KSCE Journal of Civil Engineering**, **23(11)**, 4898-4909.

- de Solminihac, H., y Echaveguren, T. (2002). Antecedentes para la inspección y diseño de especificaciones de textura, resistencia al deslizamiento y fricción en pavimentos. En Actas del VI Congreso PROVIAL (pp. 5–8). **Congreso PROVIAL**, Termas de Chillán, Chile.
- de Solminihac, H., Echaveguren, T. y Vargas, S. (2007). Friction reliability criteria applied to horizontal curve design of low volume roads. **Transportation Research Record**, **1989**, 138–147. <https://doi.org/10.3141/1989-16>
- de Solminihac, H., Echaveguren, T., Vargas, S., y Chamorro, A. (2008). A friction management method to assess paved road networks. En Proceedings of the Seventh International Conference on Managing Pavement Assets. **Alberta Infrastructure and Transportation; Transportation Research Board; Federal Highway Administration**, Canadá.
- Dhahir, B., y Hassan, Y. (2016). Reliability-based design of horizontal curves on two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, **2588(1)**, 22-31.
- Donnell, E., Wood, J., Himes, S., y Torbic, D. (2016). Use of side friction in horizontal curve design: A margin of safety assessment. **Transportation Research Record**, **2588(1)**, 61-70. <https://doi.org/10.3141/2588-07>
- Echaveguren, T. y Sáez, J. (2001). Estudio de relaciones velocidad - geometría horizontal en vías de la VIII Región. **X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, 1–12. Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte.
- Echaveguren, T., Bustos, M. y de Solminihac, H. (2005). Assessment of horizontal curves of an existing road using reliability concepts. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **32(6)**, 1030–1038. <https://doi.org/10.1139/105-056>

- Echaveguren, T., de Solminihac Tampier, H., y Bustos, M. (2006). Análisis de modelos de comportamiento temporal de la resistencia al deslizamiento en pavimentos. **Revista ingeniería de construcción**, 21(3), 157-168.
- Echaveguren, T. y de Solminihac, H. (2011). Seasonal variability of skid resistance in paved roadways. Proceedings of the **ICE – Transport**, 164(1), 41–47.
<https://doi.org/10.1680/tran.9.00007>
- Echaveguren, T., y Vargas-Tejeda, S. (2011). Diseño geométrico seguro de curvas horizontales en base a criterios de confiabilidad. **Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera**, (179), 63–70.
- Echaveguren, T., Díaz, A. y Vargas-Tejeda, S. (2015). Operating speed model for horizontal reverse curves. Proceedings of the **ICE – Transport**, 168(6), 510–522.
<https://doi.org/10.1680/jtran.13.00016>
- El-Khoury, J., y Hobeika, A. (2007). Assessing the risk in the design of passing sight distances. **Journal of Transportation Engineering**, 133(6), 370–377.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:6\(370\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:6(370))
- Fitzpatrick, K., Shamburger, C., Krammes, R., y Fambro, D. (1997). Operating speed on suburban arterial curves. **Transportation Research Record**, 1579, 89–96. Transportation Research Board.
- Forum of European National Highway Research Laboratories, FEHRL (2006). Harmonization of European routine and research measuring equipment for skid resistance. **FEHRL Report 2006/01**. Brussels, Belgium
- Gattis, J., Finley Vinson III, B., y Duncan, L. (2005). Low-speed horizontal curve friction factors. **Journal of transportation engineering**, 131(2), 112-119.

- Haldar, A. y Mahadevan, S. (2000). Probability, reliability and statistical methods in engineering design. (1ª ed.). **Wiley**.
- Hasofer, A., y Lind, N. (1974). Exact and invariant second-moment code format. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, **100(1)**, 111–121.
- Hall, J., Smith, K., Titus-Glover, L., Wambold, J., Yager, T., y Rado, Z. (2009). Guide for pavement friction. **NCHRP Project**, 1(43), 1372-76069.
- Hugemann, W., y Nickel, M. (2003). Longitudinal and lateral accelerations in normal day driving. **EVU-Jahrestagung**, **12**. Zürich, Suiza.
- Jiménez, G. (2016). **Modelación de aceleraciones laterales medidas con GPS** [Tesis de magíster, Universidad de Concepción]. Repositorio Institucional – Universidad de Concepción.
- Köhler, S., Mehler, B., y Reimer, B. (2023). Visuospatial cues and speed perception during driving: The role of optic flow. **Cognitive Research: Principles and Implications**, **8(1)**, 1–14. <https://doi.org/10.1186/s41235-023-00513-x>
- Kottegoda, N., y Rosso, R. (1997). Statistics, probability and reliability for civil and environmental engineers (1ª ed.). **McGraw-Hill**.
- Lamm, R., Choueiri, E. y Mailaender, T. (1991). Side friction demand versus side friction assumed for curve design on two-lane rural highways. **Transportation Research Record**, **1303**, 11–21.
- Lewis, E. (1987). Introduction to reliability engineering (1ª ed.). **Wiley**.

- Mahsuli, M., y Haukaas, T. (2013). Computer program for multimodel reliability and optimization analysis. **Journal of Computing in Civil Engineering**, **27(1)**, 87–98.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000204](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000204)
- Malaghan, V. y Pawar, D. (2022). A short-term naturalistic driving study on predicting comfort thresholds for horizontal curves on two-lane rural highways. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, **148(8)**, 04022045.
<https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000703>
- Ministerio de Obras Públicas, MOP. (2024). **Instrucciones y criterios de diseño. Manual de Carreteras, Volumen 3**. Santiago, Chile.
- Minitab Inc. (2014) **Software para estadísticas de Minitab. Versión 17 para Windows. State College**. Pennsylvania, Estados Unidos.
- Morrall, F. y Talarico, R. (1994). Side friction demanded and margin of safety on horizontal curves. **Transportation Research Record**, **1435**, 145–152.
- Nataf, A. (1962). Détermination des distributions de probabilités dont les marges sont données. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, **225**, 42–43.
- Navin, F. (1990). Safety factors for road design: Can they be estimated? **Transportation Research Record**, **1280**, 181–189.
- Rahmani, O., Therani, H. y Aghayan, I. (2025). Enhancing highway loop safety level through proactive risk-based assessment of geometric configuration using lateral acceleration. **Traffic Injury Prevention**, **26(1)**, 128–138.
<https://doi.org/10.1080/15389588.2024.2394110>

- Reymond, G., Keneny, A., Droulez, J., y Berthoz, A. (2001). Role of lateral acceleration in curve driving: Driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. **Human Factors**, **43(3)**, 483–495. <https://doi.org/10.1518/001872001775898188>
- Rosenblatt, M. (1952). Remarks on a multivariate transformation. **The annals of mathematical statistics**, **23(3)**, 470-472.
- Sarhan, M., y Hassan, Y. (2008). Three-dimensional, probabilistic highway design: Sight distance application. **Transportation Research Record**, **2060(1)**, 10-18.
- Said, D., Hassan, Y., y Abd El Halim, A. (2009). Comfort thresholds for horizontal curve design. **Canadian Journal of Civil Engineering**, **36(9)**, 1391-1402.
- Shin, J., y Lee, I. (2015). Reliability analysis and reliability-based design optimization of roadway horizontal curves using a first-order reliability method. **Engineering Optimization**, **47(5)**, 622-641.
- Transportation Association of Canada (1999). Geometric design guide for Canadian roads. Ottawa, Canadá.
- Vaiana, R., Iuele, T., Gallelli, V., y Rogano, D. (2018). Demanded versus assumed friction along horizontal curves: An on-the-road experimental investigation. **Journal of Transportation Safety & Security**, **10(4)**, 318–344. <https://doi.org/10.1080/19439962.2016.1277290>
- Wambold, J., Antle, C., Henry, J. y Rado, Z. (1995). International experiment to compare and harmonize skid resistance and texture measurements. **World Road Association**. Francia.

Wong, Y., y Nicholson, A. (1992). Driver behaviour at horizontal curves: risk compensation and the margin of safety. **Accident Analysis & Prevention**, 24(4), 425-436. [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(92\)90053-L](https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90053-L)

Xu, J., Yang, K., Shao, Y. y Lu, G. (2015). An experimental study on lateral acceleration of cars in different environments in Sichuan, Southwest China. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, 2015, 494130. <https://doi.org/10.1155/2015/494130>