



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



DIAGNÓSTICO DE LA SEGURIDAD VIAL EN TÚNELES CARRETEROS

POR

Mario Volpi Urbina

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía

Tomás Echaveguren Navarro

Profesional Supervisor

Juan Carrasco Montagna

Marzo 2024

Concepción (Chile)

© 2024 Mario Volpi Urbina

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

Existen diversos métodos de evaluación para medir la seguridad vial en túneles carreteros, sin embargo, en Chile, no se emplea ninguno de ellos, lo que ha resultado en la ausencia de una evaluación del nivel de riesgo en estos espacios. Por ende, esta investigación se enfoca en comprender e implementar el modelo de Wu (2020). Este modelo, estructurado en forma de checklist, abarca 14 componentes distribuidos en las categorías de infraestructura, gestión y factores ambientales.

El estudio inició con la simulación de dos escenarios para comprender el funcionamiento del modelo, logrando linealizar ocho componentes y aumentar así la replicabilidad de las calificaciones obtenidas. Se determinó que la combinación de alineamientos verticales y horizontales, la iluminación, la gestión del tráfico de vehículos con cargas peligrosas y el Transito Medio Diario Anual (TMDA) son variables críticas dentro de este modelo, destacando la importancia de recabar datos precisos sobre estos elementos, lo que permitió focalizar los esfuerzos en la recolección de información específica para los componentes más críticos. La adquisición de datos se llevó a cabo tanto para túneles concesionados como públicos. Para los primeros, se utilizaron principalmente bases de licitación y reglamentos de servicio, mientras que para los túneles públicos, se enfrentaron dificultades debido a la falta de información fácilmente accesible, lo que requirió visitas a terreno, consultorías y análisis de noticias.

los túneles carreteros en Chile presentan un índice de riesgo bajo, con una calificación promedio de 34. Los túneles concesionados poseen un alto estándar, con calificaciones sobresalientes, con una calificación promedio de 31 indicando un nivel de riesgo bajo. Mientras que cuatro de los ocho túneles públicos poseen un nivel de riesgo moderado con una calificación promedio de 39, esto debido a que en algunos no existían instalaciones de monitoreo o la falta de herramientas de seguridad, siendo urgente la modernización y actualización de estos para llegar a un nivel de seguridad mayor.

ABSTRACT

There are various evaluation methods to measure road safety in tunnels, however, in Chile, none of them are employed, resulting in the absence of an assessment of the risk level in these spaces. Therefore, this research focuses on understanding and implementing Wu's model (2020). This model, structured in the form of a checklist, covers 14 components distributed across the categories of infrastructure, management, and environmental factors.

The study began with the simulation of various scenarios to understand the functioning of the model, successfully linearizing 8 components and thus increasing the replicability of the obtained ratings. It was determined that the combination of vertical and horizontal alignments, lighting, management of traffic with hazardous loads, and the Annual Average Daily Traffic (AADT) are critical variables within this model, highlighting the importance of collecting precise data on these elements. This allowed focusing efforts on gathering specific information for the most critical components. Data acquisition was carried out for both concessioned and public tunnels. For the former, mainly tender bases and service regulations were used, while for public tunnels, difficulties were faced due to the lack of easily accessible information, requiring field visits, consultations, and news analysis.

Road tunnels in Chile exhibit an average low risk index, with an average rating of 34. Concessioned tunnels have a high standard, with outstanding ratings, averaging 31 indicating a low level of risk. Meanwhile, four out of the eight public tunnels have a moderate risk level with an average rating of 39, this is because some of them lacked monitoring facilities or safety tools, requiring urgent modernization, and updating to achieve a higher level of safety.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, quienes han sido el soporte incondicional a lo largo de esta travesía académica. Su amor, comprensión y aliento han sido mi mayor motivación. Agradezco sinceramente a mis padres por su sacrificio y dedicación, siempre creyendo en mí y brindándome las herramientas necesarias para alcanzar mis metas.

Agradezco a mis profesores, cuya guía y enseñanzas han sido fundamentales en mi formación como ingeniero. Su experiencia y conocimientos compartidos han sido la base sobre la cual construí este trabajo de investigación. Su paciencia y apoyo constante han sido un faro en mi camino académico.

No puedo pasar por alto la importancia de la red de amigos que he construido a lo largo de mis años en la universidad. A aquellos compañeros que se convirtieron en amigos cercanos, gracias por compartir risas, desafíos y, sobre todo, por ser un pilar emocional durante los momentos más difíciles. Sin ustedes, el viaje habría sido incompleto.

<i>CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología de trabajo.....	2
1.5 Principales resultados y conclusiones	3
1.6 Organización de documento	3
<i>CAPITULO 2 SEGURIDAD VIAL EN TÚNELES CARRETEROS</i>	4
2.1 Introducción	4
2.2 Los túneles carreteros.....	4
2.3 Comportamiento de los conductores y siniestros de tráfico en túneles carreteros.....	6
2.4 Equipamiento de seguridad en túneles carreteros	8
2.5 Modelos de evaluación de seguridad vial en túneles carreteros.....	9
2.6 Conclusiones	12
<i>CAPITULO 3 ANÁLISIS DEL MODELO DE SEGURIDAD VIAL PARA TÚNELES CARRETEROS</i>	13
3.1 Introducción	13
3.2 Metodología de análisis.....	13
3.3 Túnel tipo	14
3.4 Linealización de variables cuantitativas.....	14
3.5 Definición de distribución de probabilidades de variables cualitativas	18
3.6 Simulación de escenarios	19
3.7 Conclusiones	21
<i>CAPITULO 4 ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS</i>	23
4.1 Introducción	23

4.2 Muestra de túneles para el estudio	23
4.3 Factores de infraestructura	24
4.4 Factores ambientales	28
4.5 Factores de gestión	30
4.6 Conclusiones	33
<i>CAPITULO 5 CALIFICACIONES DE NIVEL DE RIESGO</i>	<i>34</i>
5.1 Introducción	34
5.2 Calificaciones globales y nivel de riesgo	34
5.3 Calificación individual factores de infraestructura	35
5.4 Calificación individual factores ambientales	40
5.5 Calificación individual factores de gestión	41
5.6 Conclusiones	44
<i>CAPITULO 6 CONCLUSIONES</i>	<i>45</i>
<i>CAPITULO 7 REFERENCIAS</i>	<i>47</i>
<i>CAPITULO 8 ANEXOS</i>	<i>49</i>
Anexo 4.1 Catastro de túneles carreteros en Chile.....	49
Anexo 4.2 Datos recolectados de túneles chilenos	50
Anexo 5.1 Calificaciones globales de los túneles chilenos	60
Anexo 5.2 Metodología de puntuación propuesta.....	61
Anexos digitales	70

Índice De Tablas

Tabla 2.1 Requisitos de seguridad según la categorial del túnel.....	6
Tabla 2.2 Equipamiento de seguridad.....	9
Tabla 2.3. Extracto lista de verificación.....	11
Tabla 2.4. Clasificación de ponderadores	11
Tabla 2.5. Niveles de riesgo.....	12
Tabla 3.1. Características de túnel tipo.....	14
Tabla 3.2. Ecuaciones de las componentes del modelo	18
Tabla 3.3. Distribución de frecuencias de probabilidad.....	19
Tabla 4.1. Muestra de túneles	23
Tabla 4.2. Longitud de túneles	24
Tabla 4.3. Resistencia al deslizamiento (SFC)	25
Tabla 4.4. Distancia a salida de emergencia	26
Tabla 4.5. Estado de instalaciones de monitoreo	28
Tabla 4.6. Transito medio diario anual.....	29
Tabla 4.7. Porcentaje de vehículos pesados	31
Tabla 4.8. Tasa de accidentes	31
Tabla 4.9. Límite de velocidad.....	32
Tabla 4.10. Reglamento gestión de vehículos con carga peligrosa.....	36
Tabla 5.1. Calificaciones individuales de longitud del túnel.....	36
Tabla 5.2. Calificaciones individuales de combinación de alineamientos	37
Tabla 5.3. Calificaciones individuales de resistencia al deslizamiento.....	37
Tabla 5.4. Calificaciones individuales de las instalaciones de seguridad.....	38
Tabla 5.5. Calificaciones individuales de iluminación.....	39
Tabla 5.6. Calificaciones individuales de distancia a salida de emergencia	39
Tabla 5.7. Calificaciones individuales de instalaciones de monitoreo.....	40
Tabla 5.8. Calificaciones individuales de tránsito medio diario anual.....	41
Tabla 5.9. Calificaciones individuales de porcentaje de vehículos pesados.....	42
Tabla 5.10. Calificaciones individuales de factores climáticos.....	41
Tabla 5.11. Calificaciones individuales de tasa de accidentes.....	42

Tabla 5.12. Calificaciones individuales de límite de velocidad.....	42
Tabla 5.13. Calificaciones individuales de tiempo de respuesta a emergencia.....	43
Tabla 5.14. Calificaciones individuales gestión de vehículos con carga peligrosa	44
Tabla A.4.1.1. Túneles chilenos	49
Tabla A.4.2.1. Catastro de combinación alineamientos verticales/horizontales	50
Tabla A.4.2.2. Catastro de iluminación.....	51
Tabla A.4.2.3. Catastro de instalaciones de seguridad	52
Tabla A.4.2.4. Flujo vehicular por sentido	53
Tabla A.4.2.5. Datos meteorológicos de la estación Coyhaique.....	54
Tabla A.4.2.6. Datos meteorológicos de la estación Tocopilla	54
Tabla A.4.2.7. Datos meteorológicos de la estación Valparaíso	55
Tabla A.4.2.8. Datos meteorológicos de la estación Quillota	55
Tabla A.4.2.9. Datos meteorológicos de la estación Buin	56
Tabla a.4.2.10. Datos meteorológicos de la estación Pedelhue.....	56
Tabla A.4.2.11. Datos meteorológicos de la estación Llay-Llay.....	57
Tabla A.4.2.12. Datos meteorológicos de la estación Lo Prado.....	57
Tabla A.4.2.13. Datos meteorológicos de la estación Colina	58
Tabla A.4.2.14. Datos meteorológicos de la estación Catapilco	58
Tabla A.4.2.15. Número de accidentes en túneles carreteros año 2022.....	59
Tabla A.5.1.1. Calificaciones globales y nivel de riesgo en túneles carreteros.....	60

Índice De Figuras

Figura 2.1 Categoría de túneles	5
Figura 2.2 Zonas de túneles	7
Figura 3.1 Longitud del túnel.....	15
Figura 3.2 Resistencia al deslizamiento (SFC)	15
Figura 3.3 Distancia a salida de emergencia.....	16
Figura 3.4 Transito medio diario anual.....	16
Figura 3.5 Porcentaje de vehículos pesados.....	16
Figura 3.6 Tasa de accidentes.....	17
Figura 3.7 Límite de velocidad.....	17
Figura 3.8 Tiempo de respuesta a emergencia.....	17
Figura 3.9 Análisis de sensibilidad escenario 1.....	20
Figura 3.10 Análisis de sensibilidad escenario 2.....	20
Figura 5.1 Calificaciones globales y nivel de riesgo para túneles carreteros.....	34

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los túneles se utilizan para conectar áreas separadas por barreras naturales, como montañas, ríos o colinas. Estos túneles permiten el paso de vehículos de una manera segura y eficiente, ya que eliminan la necesidad de construir carreteras en terrenos difíciles o peligrosos para la conducción. También pueden ser utilizados para aliviar el tráfico en áreas urbanas densamente pobladas, ya que proporcionan una ruta alternativa para el transporte de vehículos. Además, en algunos casos, los túneles pueden ser utilizados para mejorar la estética y la calidad de vida en las ciudades, al eliminar el tráfico de la superficie y reducir la contaminación acústica y del aire.

La seguridad vial en túneles carreteros se enfoca en los riesgos asociados con la circulación de vehículos en espacios cerrados y con una limitada visibilidad. Los accidentes en túneles pueden tener consecuencias severas para los usuarios de la vía, como lesiones graves o incluso la pérdida de vidas, Por lo tanto, es fundamental estudiar la seguridad vial en túneles para identificar y analizar los posibles factores de riesgo, y tomar medidas preventivas y correctivas para garantizar la seguridad de los usuarios de la vía en estos espacios.

Chile cuenta con 34 túneles carreteros a lo largo de su territorio, en los cuales solo el año 2022 existieron 17 accidentes. En el año 2023 ocurrió un choque múltiple entre un bus y tres camiones en el túnel Zapata, dejando varios fallecidos en el lugar y tráfico suspendido durante varias horas. A nivel mundial se recuerda el fatídico accidente de Mont Blanc donde murieron 39 personas. Este accidente dio paso a la creación de la norma europea para la seguridad en túneles.

Existen distintos modelos de evaluación para la seguridad vial en túneles carreteros alrededor del mundo con cada país adaptando un modelo a su realidad. Sin embargo, actualmente, en Chile no se dispone con ningún método para realizar una evaluación de riesgo. Por esta razón, se busca implementar un método que permita identificar y cuantificar los factores de riesgo y evaluar la efectividad de las medidas existentes de seguridad.

1.2 Objetivo general

Diagnosticar el estado de la seguridad vial en túneles carreteros en Chile.

1.3 Objetivos específicos

1. Comprender el modelo de Wu (2020) para evaluar la seguridad vial en túneles carreteros
2. Recopilar datos sobre propiedades ambientales, de gestión e infraestructura para la implementación del modelo de Wu (2020)
3. Calificar el nivel de riesgo de siniestros para la muestra de túneles.

1.4 Metodología de trabajo

La metodología implementada en este estudio se estructuró en cuatro etapas. En la primera etapa, se realiza un análisis bibliográfico de distintos modelos de riesgos de siniestros de tránsito. En la segunda etapa se llevó a cabo una simulación de Montecarlo de dos escenarios para analizar y comprender el comportamiento del modelo de Wu (2020) bajo diversas condiciones.

La tercera etapa se centró en la recopilación de datos de propiedades relevantes para la evaluación de los túneles chilenos. Se recopiló información detallada sobre 14 componentes, abarcando aspectos relacionados con la infraestructura, el entorno ambiental y la gestión, tanto para túneles concesionados como públicos. Esta fase aseguró la obtención de datos completos y representativos para cada componente evaluado.

Finalmente, en la cuarta etapa, se calificó del nivel de riesgo de los túneles carreteros. Se realizó una evaluación global considerando las calificaciones individuales asignadas a cada componente. Este enfoque proporcionó una visión del riesgo asociado a cada túnel, permitiendo la identificación de áreas específicas que podrían requerir atención y mejoras.

1.5 Principales resultados y conclusiones

De los 17 túneles concesionados, todos muestran un nivel de riesgo bajo, con una calificación promedio de 31 puntos en una escala de 0 a 100, donde 0 representa el nivel más seguro y 100 el más inseguro. Por otro lado, de los siete túneles públicos, la mitad se encuentra en un nivel de riesgo bajo, mientras que la otra mitad exhibe un riesgo moderado, con una calificación promedio de 39 puntos. Reflejando una disparidad significativa entre la infraestructura pública y concesionada.

Los factores de riesgo de siniestros más relevantes son la combinación de alineamientos verticales y horizontales, la gestión de vehículos con cargas peligrosas, el tránsito medio diario anual y los factores climáticos.

Este estudio representa una primera aproximación a la gestión de la seguridad en túneles carreteros en el país, proponiendo una metodología de calificación que puede servir como herramienta valiosa para la toma de decisiones en el ámbito de la seguridad vial.

1.6 Organización de documento

Este documento consta de 6 capítulos. El primero es una introducción que establece el la motivación de la investigación, el contexto del problema, los objetivos del estudio y la estructuración del documento. El segundo capítulo aborda aspectos de diseño, accidentes ocurridos en túneles, consideraciones sobre la conducción y métodos de evaluación de la seguridad vial utilizados a nivel mundial. En el capítulo 3 se examina el modelo seleccionado para llevar a cabo la evaluación y se presentan los resultados de simulaciones realizadas para comprender mejor su funcionamiento, identificando las variables de mayor influencia en el proceso. El capítulo 4 detalla la información recopilada y los métodos utilizados para obtener los datos de cada componente que serán empleados en el siguiente capítulo. En el capítulo 5 se lleva a cabo la calificación de la muestra de túneles seleccionada, mostrando las calificaciones individuales y globales para cada uno, además de realizar un análisis comparativo entre túneles concesionados y públicos. Finalmente, el sexto capítulo presenta las conclusiones derivadas de la investigación realizada, ofreciendo un resumen de los hallazgos y sugiriendo diversas líneas de investigación para el futuro.

CAPITULO 2 SEGURIDAD VIAL EN TÚNELES CARRETEROS

2.1 Introducción

En este capítulo se analiza la literatura existente, se examinan los diferentes aspectos relacionados con los túneles carreteros, incluyendo su diseño, comportamiento de conductores dentro de estos y tipos de accidentes, así como las medidas para evaluar la seguridad vial dentro de estos espacios cerrados.

2.2 Los túneles carreteros

Un túnel se define como una estructura subterránea que permite el paso seguro y eficiente de vehículos, peatones u otros elementos a través de obstáculos geográficos o urbanos. Con una planificación meticulosa y un diseño estructural adecuado, los túneles ofrecen una solución vital para la conectividad y la movilidad en entornos donde la construcción de superficie no es viable o deseable debido a limitaciones geológicas, ambientales o urbanas. Estas estructuras requieren una atención especial en términos de diseño geométrico, ventilación, iluminación, drenaje, y sistemas de seguridad, con el fin de garantizar condiciones óptimas para la circulación segura de vehículos y el tránsito peatonal, minimizando riesgos asociados a incendios, colisiones, y situaciones de emergencia.

El diseño de un túnel es caracterizado por la forma de su sección transversal y ésta está definida por su recubrimiento (*lining*) según su área de construcción, el nivel sísmico de la zona, condiciones geológicas, etc. Éste proporciona durabilidad, operabilidad, confianza entre otros.

Los túneles pueden clasificarse por la forma de su sección transversal y/o según su método de construcción:

- Forma de sección transversal: Circular, abovedada, elíptica/ovalada y rectangular.
- Método de construcción: Abierto (*cut and cover*), Bajo tierra (*mining, panel board, breakdown*) y Especiales (*immersed*)

La clasificación de túneles en carreteras permite una división en grupos que facilita la identificación de las características constructivas y técnicas. Esta clasificación comprende distintas categorías según su ubicación con relación al relieve terrestre (montaña, submarino o plano), la clase de sismicidad en la zona de construcción (dentro o fuera de la zona de influencia sísmica), la profundidad de construcción (superficial o profunda) y el grupo que se establece según el diseño (cantidad de niveles y tramos).

En Chile, los túneles se clasifican en diferentes categorías que definen características de diseño, operatividad y construcción. La categoría del túnel dependerá de su longitud del TMDA (Tránsito Medio Diario Anual) esperado a los 20 años desde el inicio de la operación.

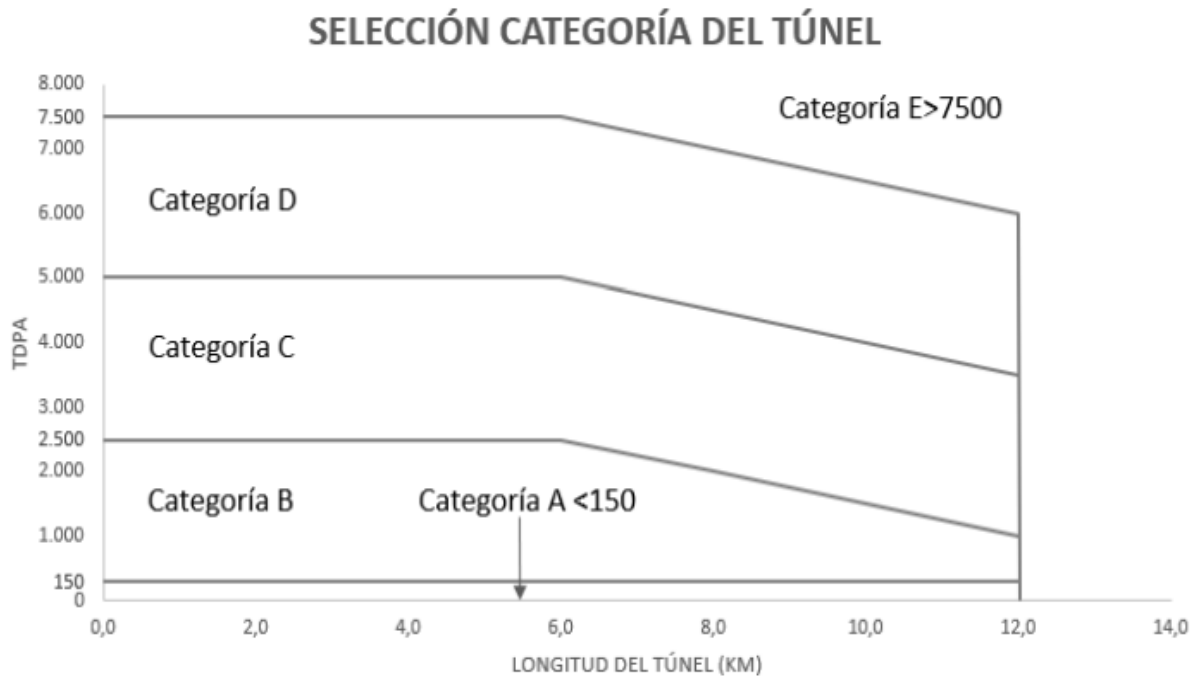


Figura 2.1 Categoría de túneles (Ministerio de obras públicas, 2023)

Con la categoría del túnel definida se define el número de pistas, la necesidad de túneles auxiliares y requisitos de seguridad vial necesarios. El manual de recomendaciones de estándares generales básicos para proyectos de túneles viales aprobado en 2023, proporciona orientación sobre el diseño y equipamiento, y en casos no contemplados, remite a los criterios establecidos en la directiva europea como también a la norma estadounidense NFPA 502 (Ministerio de obras públicas 2023).

Tabla 2.1 Requisitos de seguridad según la categoría del túnel (Ministerio de obras públicas, 2023)

Componente	Item	Subitem	Categoría del Túnel				
			A	B	C	D	E
I N F R A E S T R U C T U R A	P r o y e c t o S e g u r o	Calzada	3,5 m	7,0 m	7,0 m	7,0 + 7,0 m	Diseño especial con Estudio de Riesgos
		Bermas	0,75 m a ambos costados	1,00 m a ambos costados	1,00 m a ambos costados	1,00 m a ambos costados	
		Pasillo Peatonal de Emergencia	0,75 m a ambos costados	0,75 m a ambos costados	0,75 m a ambos costados	0,75 m a ambos costados	
		Galibo - Area Libre de Obstáculos	5,1 m alto por 5,0 m de ancho	5,1 m alto por 9,0 m de ancho	5,1 m alto por 9,0 m de ancho	5,1 m alto por 9,0 m de ancho	
		Equipamiento	Según lo indicado en Capítulo 9				
		Barreras	Según requerimientos del Depto. de Seguridad Vial				
		Señalización	Según Capítulo 8.2.1, con aprobación del Depto. de Seguridad Vial				
		Saneamiento	Según necesidades y conforme al Manual de Carreteras				
		Bahías de Emergencia	cada 500 m	cada 1.000 m por pista (o sentido)	cada 1.000 m por pista (o sentido)	cada 1.000 m por pista	
		Salidas de Emergencia Peatonales	Refugio cada 500 m	Salida Peatonal o Refugio cada 500 m	Salida Peatonal cada 500 m	Salida Peatonal cada 500 m	
		Salidas de Emergencia Mixtas (Vehiculares y Peatonales)	---	---	Cada 1.500 m	Cada 1.500 m	
	Estacionamiento exterior	Si	Si	Si	Si		
	Construcción Segura	Señalización Transitoria	Solo entre sectores de obras y vías de circulación en operación				
Gestión de Flujos		Si	Solo entre sectores de obras y vías de circulación en operación				

2.3 Comportamiento de los conductores y siniestros de tráfico en túneles carreteros

El comportamiento de los conductores y los siniestros de tráfico son los elementos más importantes al momento de diseñar un túnel y las normativas (Amundsen y Raner, 2000). Conducir a través de un túnel puede generar ansiedad, incertidumbre e incluso miedo a colisionar con otros vehículos o con las paredes del túnel, además de preocupaciones sobre posibles situaciones como incendios o el colapso de la estructura misma. Como resultado, los conductores tienden a reducir la velocidad y a mantenerse alejados de las paredes del túnel, adoptando una conducción más cautelosa. Esto se puede interpretar como un estado de alerta constante, necesitando una mayor atención y aumentando la carga de trabajo generando estrés en los conductores lo que aumenta el riesgo de verse involucrado en siniestros de tráfico (Caliendo et al., 2013).

Amundsen y Raner (2000) llevaron a cabo un estudio exhaustivo para investigar la correlación entre los accidentes de tránsito y diversas características dentro de los túneles. La investigación se basó en el análisis de 587 túneles en Noruega, utilizando datos de accidentes y su ubicación dentro de los túneles proporcionados por informes policiales. Los accidentes fueron categorizados y distribuidos en las áreas definidas en la Figura 2.2.

Por otro lado, Bassan (2016) realizó una revisión exhaustiva de estudios previos, incluyendo datos de accidentes de tránsito dentro de túneles de diferentes países, como China, Austria, Noruega, Suiza y Singapur. Estos datos fueron clasificados y distribuidos en las mismas zonas definidas por Amundsen y Raner (2000).

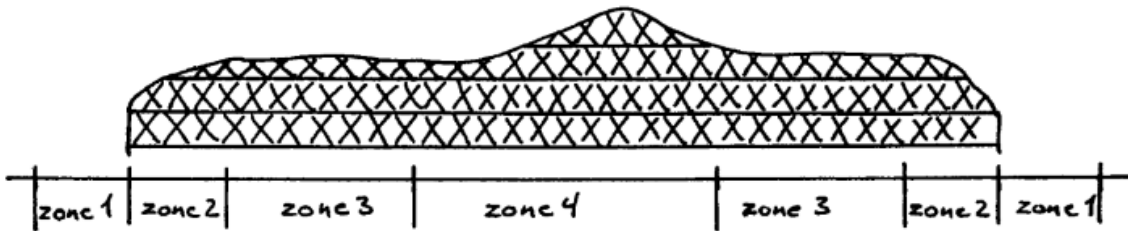


Figura 2.2 Zonas de túneles (Amundsen & Raner, 2000; Bassan, 2016)

- Zona 1: 50-100 primeros metros antes de la entrada al túnel
- Zona 2: 50-100 primeros metros del túnel (zona de entrada)
- Zona 3: 100-300 siguientes metros (zona de transición)
- Zona 4: Resto del túnel (zona intermedia)

Amundsen y Raner (2000) y Bassan (2016) Concluyen que la zona 1 es donde la tasa de accidentes es mayor debido a las condiciones de iluminación, ya que al momento de ingreso y salida del túnel los conductores no logran anticipar los eventos del tránsito puesto que se presenta una diferencia significativa en la iluminación interior y exterior del túnel, lo que genera problemas en la visibilidad de los usuarios mientras que el vehículo sigue avanzando (*black-hole/White-hole effects*) (Bassan, 2016; Lemke, 2000; Lu et al., 2022).

Si bien la zona 1 es donde la tasa de accidentes (accidentes por millón de vehículo kilometro año) es mayor, es en la zona 4 donde ocurren la mayor cantidad de los accidentes. La zona de transición es una de las áreas más peligrosas, Cuando un vehículo se acerca a un túnel, el conductor normalmente

reduce la velocidad mientras se acerca a la entrada del túnel para adaptarse a las condiciones de luz tenue (*black-hole effect*), después de entrar en el túnel, el conductor reduce la velocidad aún más (velocidad inferior a la de una carretera). Estas fluctuaciones de velocidad tienen un impacto negativo en la seguridad del tráfico (Lemke, 2000).

La tasa de accidentes por vehículo/km en un túnel es menor que en una carretera convencional. El porcentaje de accidentes graves en túneles es del 1% de los accidentes graves de los Países Bajos (SWOV, 2011). En las autopistas italianas, el 4% de los accidentes graves ocurrieron en túneles carreteros (Nussbaumer Cornelia & Austrian Road Safety Board, 2007). Sin embargo el riesgo de morir en un accidente de tráfico es dos veces mayor en túneles que en autopistas. En las autopistas, el 3.3% de los incidentes de lesiones en accidentes son mortales, mientras que en los túneles de carretera este porcentaje aumenta al 8.2% (Bassan, 2016).

2.4 Equipamiento de seguridad en túneles carreteros

Todos los túneles, cualquiera sea su longitud y categoría, requieren equipamientos específicos para mejorar la seguridad del usuario, tanto en situación normal de servicio como en caso de accidente (Ministerio de obras públicas, 2023.).

Para reducir los riesgos de accidente, limitar sus posibles consecuencias y para proporcionar un adecuado nivel de seguridad y comodidad a los usuarios, se debe proyectar la instalación de una gran variedad de equipamientos de acuerdo a estándares internacionales, adaptados a las condiciones locales.

En general, el nivel de equipamiento mínimo a instalar en un túnel deberá seguir las indicaciones de la Tabla 2.2. Adicionalmente los túneles concesionados deben cumplir con los requisitos de las bases de licitación (Dirección General de Concesiones, n.d.)

Tabla 2.2 Equipamiento de seguridad (Ministerio de obras públicas, 2023)

EQUIPAMIENTO	CATEGORÍA TÚNEL (Según tabla N° 1)				
	A	B	C	D	E
Iluminación normal	x	x	x	x	x
Iluminación de seguridad		x	x	x	x
Iluminación de evacuación		x	x	x	x
Equipos eléctricos de emergencia		x	x	x	x
Ventilación	o	x	x	x	x
Red de Incendio		x	x	x	x
Extintores		x	x	x	x
Cámaras Televisión CCTV		o	x	x	x
Cámaras para incidentes DAI		o	x	x	x
Galerías de evacuación		o	x	x	x
Galerías de conexión a otro tubo			o	x	x
Altavoces		x	x	x	x
Estaciones de emergencia		x	x	x	x
Estaciones SOS		x	x	x	x
Semáforos	o	o	o	x	x
Paneles informativos (variables)			x	x	x
Señalética Vial Lateral	o	x	x	x	x
Señalética Vial Horizontal	o	x	x	x	x
Señalética de emergencia		o	x	x	x
Centro de Control		o	x	x	x
o optativo					
x obligatorio					

2.5 Modelos de evaluación de seguridad vial en túneles carreteros

El método de evaluación de la norma europea “*Minimum requirements for tunnel safety in the trans-European road network*” se basa principalmente en la combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos. Según los requisitos de esta norma, es necesario llevar a cabo una evaluación de seguridad en el túnel y establecer una organización especial llamada Eurotest para verificar y evaluar el grado de riesgo y seguridad del túnel de carretera existente (European Union, 2004). Establece los siguientes requisitos para garantizar la seguridad de los usuarios de los túneles de carretera:

- La instalación de sistemas de iluminación adecuados para proporcionar una visibilidad suficiente para los conductores.
- La instalación de sistemas de detección de incendios y de extinción de incendios adecuados.
- La definición de procedimientos operativos y de seguridad claros para la gestión de emergencias en el túnel.

- Señalización adecuada los túneles deben tener una señalización clara y visible para guiar a los usuarios del túnel, especialmente en caso de una emergencia.

La normativa europea presenta algunas limitaciones, como un sistema de índices de evaluación imperfecto, la falta de consideración de la influencia en el comportamiento humano y la estructura organizacional (Wu, 2020).

El modelo austriaco TuRisMo complementa la normativa europea, adaptándose específicamente a las necesidades y realidades del país. Este se basa en un análisis cuantitativo de frecuencia para identificar los peligros potenciales y la secuencia de eventos desde un suceso inicial. Luego, mediante un análisis detallado, se evalúa la probabilidad y el impacto de las consecuencias físicas de estos peligros, clasificándolos según su gravedad y ocurrencia. Con esta información se compara el riesgo del túnel con un túnel de referencia establecido por los requerimientos mínimos por la normativa europea, así implementando medidas de mitigación adecuadas (B. Kohl et al., 2007).

El modelo desarrollado por Wu (2020) se basa en una lista de verificación que enfoca su atención en factores de infraestructura, el entorno ambiental y la gestión. Dentro del factor de infraestructura, las componentes consideradas son la longitud, la combinación de alineamientos verticales y horizontales, la resistencia al deslizamiento, las instalaciones de seguridad, las instalaciones de monitoreo, la distancia a la salida de emergencia y la iluminación. En cuanto al factor de gestión, se incluyen componentes como la tasa de accidentes, el límite de velocidad, el tiempo de respuesta y la gestión de vehículos con carga peligrosa. Por último, el factor ambiental aborda componentes como el tráfico medio diario anual (TMDA), el porcentaje de vehículos pesados y los factores climáticos.

Con base en los datos recopilados, se asignan calificaciones R_{ij} de 0 a 100 a cada componente del modelo, que luego son ponderadas por un factor γ_{ij} establecido por expertos. A esta calificación ponderada se le denomina calificación individual T_{ij} . La suma de todas las calificaciones individuales resulta en la calificación global R . Wu (2020) realiza una distinción entre *Expressway Highway Tunnels* y *Standard Highway Tunnels*, basada en la categoría de la vía, donde los primeros son túneles multipista.

La Tabla 2.3 ilustra un fragmento de la lista de verificación ideada por Wu (2020) y en la Tabla 2.4 los ponderadores establecidos. Mientras que las ecuaciones 2.1 y 2.2 ejemplifican el funcionamiento fundamental del modelo propuesto.

$$T_{ij} = \gamma_{ij} \cdot R_{ij} \tag{2.1}$$

$$R = \sum T_{ij} \tag{2.2}$$

Tabla 2.3. Extracto lista de verificación (Wu, 2020).

Factores	Componentes	Clasificación	Valor Túnel 1	Coficiente (γ_{ij})	Calificación Individual	Calificación Global
		L>3000m				
Infraestructura	Longitud del Túnel	1000m<L<3000m 500m<L<1000m	Rij 1	γ_{ij} 1	Tij 1	
		L<500m				
		TMDA>30000				
Ambientales	Transito Medio Diario Anual	10000<TMDA<30000 4000<TMDA<10000	Rij 2	γ_{ij} 3	Tij 2	R
		TMDA<4000				
		SL>100km/h				
Gestión	Límite de Velocidad	80km/h<SL<100km/h 60km/h<SL<80km/h	Rij 3	γ_{ij} 3	Tij 3	
		SL<60km/h				

Tabla 2.4. Clasificación de ponderadores (Wu, 2020).

Componente	Coficiente γ	Componente	Coficiente γ	Componente	Coficiente γ
Longitud del túnel	0,14	Distancia a salida de emergencia	0,02	Tasa de accidentes	0,12
Combinación de alineamientos Verticales y horizontales	0,11	Instalaciones de Monitoreo	0,03	Límite de Velocidad	0,07
Resistencia al deslizamiento	0,06	TMDA	0,13	Tiempo de respuesta a emergencia	0,01
Instalaciones de seguridad	0,05	Porcentaje de vehículos pesados	0,09	Gestión de Vehículos con sustancias peligrosas	0,1
Iluminación	0,08	Factores climáticos	0,04		

Utilizando la Calificación Global R , se identifican y diferencian los distintos niveles de riesgo, según lo indicado en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Niveles de riesgo (Wu, 2020).

Nivel de Riesgo	R
Grado 4 (Muy alto)	$R > 80$
Grado 3 (Alto)	$60 < R \leq 80$
Grado 2 (Moderado)	$40 < R \leq 60$
Grado 1 (Bajo)	$R \leq 40$

2.6 Conclusiones

El diseño meticuloso y la categorización adecuada de los túneles carreteros son fundamentales para garantizar su seguridad y eficiencia. Esto se ve respaldado por la importancia del comportamiento del conductor dentro de estos espacios, donde factores como la iluminación y la visibilidad desempeñan un papel crucial en la prevención de accidentes. Además, la instalación de equipamiento específico es esencial para reducir los riesgos y asegurar la protección de los usuarios en todas las circunstancias

Existen distintos métodos de evaluación de seguridad vial para túneles, como el modelo TuRisMo en Austria o el propuesto por Wu (2020). Sin embargo, aún no se ha implementado ninguno en Chile. Estos modelos emplean una combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos para evaluar diversos aspectos de seguridad. El modelo de Wu destaca como una excelente herramienta para una primera evaluación de seguridad en túneles de carretera. Evalúa una amplia gama de factores, incluyendo infraestructura, gestión y aspectos ambientales, a través de 14 componentes distintos. Esta metodología proporciona una evaluación integral de manera simple y fácil de aplicar.

CAPITULO 3 ANÁLISIS DEL MODELO DE SEGURIDAD VIAL PARA TÚNELES CARRETEROS

3.1 Introducción

Este capítulo presenta la primera fase de la metodología que guió la investigación. Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de las variables dentro del modelo propuesto por Wu (2020) mediante la realización de simulaciones de Montecarlo en diversos escenarios definidos utilizando un túnel representativo para lograr comprender de mejor manera cómo funciona el modelo.

3.2 Metodología de análisis

Para comprender el modelo de seguridad vial para túneles carreteros propuesto por Wu (2020), se empleó una metodología rigurosa que abarcó varias etapas de análisis y simulación. La primera fase de esta metodología consistió en la realización de un análisis de las variables presentes en el modelo, utilizando simulaciones de Montecarlo en diversos escenarios definidos. Estos escenarios se basaron en un túnel representativo que cumplía con estándares de seguridad y tráfico comunes. Una vez establecido este túnel tipo, se procedió a la linealización de las variables cuantitativas presentes en el modelo, las cuales mostraban un comportamiento lineal dentro de los rangos de calificaciones establecidos por el modelo de Wu. Este proceso simplificó la modelización y predicción de las calificaciones globales de los túneles, eliminando la subjetividad de las mediciones.

Posteriormente, se definieron distribuciones de probabilidad para las seis variables no linealizables del modelo, tales como la combinación de alineamientos, las instalaciones de seguridad, la iluminación, las instalaciones de monitoreo, los factores climáticos y la gestión de vehículos con sustancias peligrosas. Estas distribuciones de probabilidad permitieron simular escenarios y comprender mejor el funcionamiento del modelo en situaciones reales.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad mediante simulaciones utilizando el método Montecarlo con el software "Oracle Crystal Ball". Estas simulaciones permitieron identificar las variables de mayor influencia en el modelo de seguridad vial para túneles carreteros.

3.3 Túnel tipo

Para la simulación de escenarios, se estableció un túnel tipo que sirve como representación de un túnel con estándares de seguridad y tráfico comunes. Las características de este túnel tipo se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características túnel tipo (Wu, 2020).

Componente	Valor
Longitud del túnel (m)	1200
Resistencia al deslizamiento (SFC)	0,45
Distancia a salida de emergencia (m)	400
TMDA	20000
Porcentaje de vehículos pesados(%)	10
Tasa de accidentes (Millón de vehículo kilometro)	0,2
Límite de Velocidad (km/h)	60
Tiempo de respuesta a emergencia (min)	10

3.4 Linealización de variables cuantitativas

Al examinar las variables presentes en el modelo, se observó que algunas de ellas mostraban un comportamiento lineal dentro de los rangos de calificaciones establecidos por el modelo. Estas variables incluyen la longitud del túnel, la resistencia al deslizamiento, la distancia a la salida de emergencia, el tráfico medio diario anual, el porcentaje de vehículos pesados, la tasa de accidentes, el límite de velocidad y el tiempo de respuesta a emergencias. La linealización de estas variables simplifica la modelización y predicción de las calificaciones globales de los túneles, eliminando la subjetividad de las mediciones.

Se generaron gráficos para todas las variables con el fin de derivar las ecuaciones correspondientes y representar el comportamiento de dichas variables. Para garantizar un ajuste adecuado de las

ecuaciones a los datos linealizados, se estableció un umbral mínimo de 0.9 para el coeficiente de determinación (R cuadrado). Es importante destacar que la longitud del túnel es la única variable representada por una ecuación segmentada.

A continuación, se exhiben los gráficos de todas las variables linealizadas, donde se ilustra el comportamiento de cada variable en relación con los diferentes valores que pueden tomar en el eje X, frente a la escala de calificaciones definida por el modelo en el eje Y.

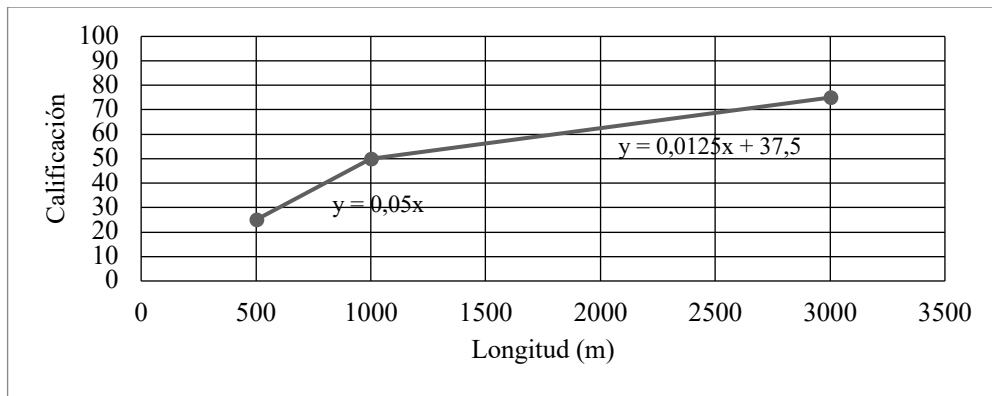


Figura 3.1 Longitud del túnel

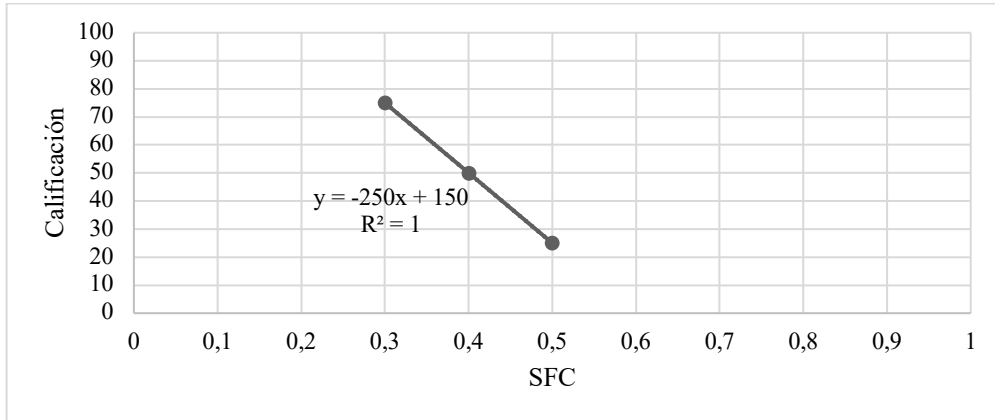


Figura 3.2 Resistencia al deslizamiento (SFC)

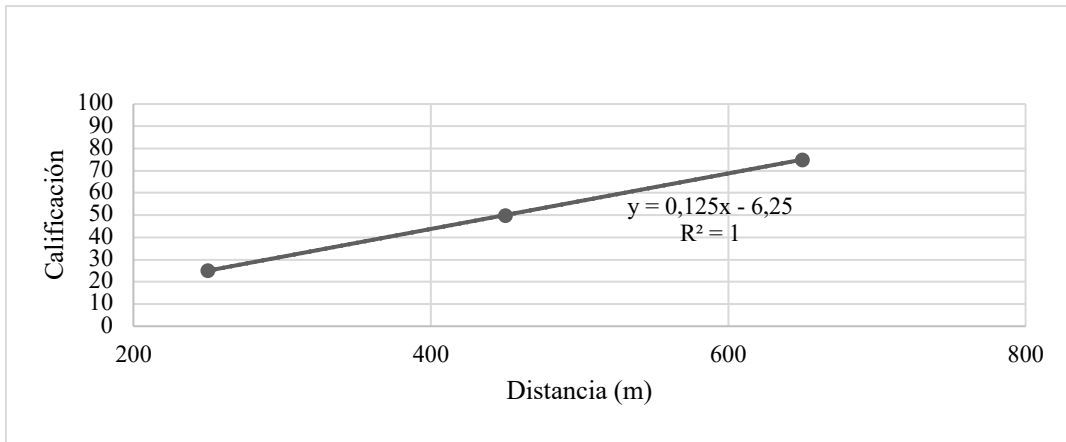


Figura 3.3 Distancia a salida de emergencia

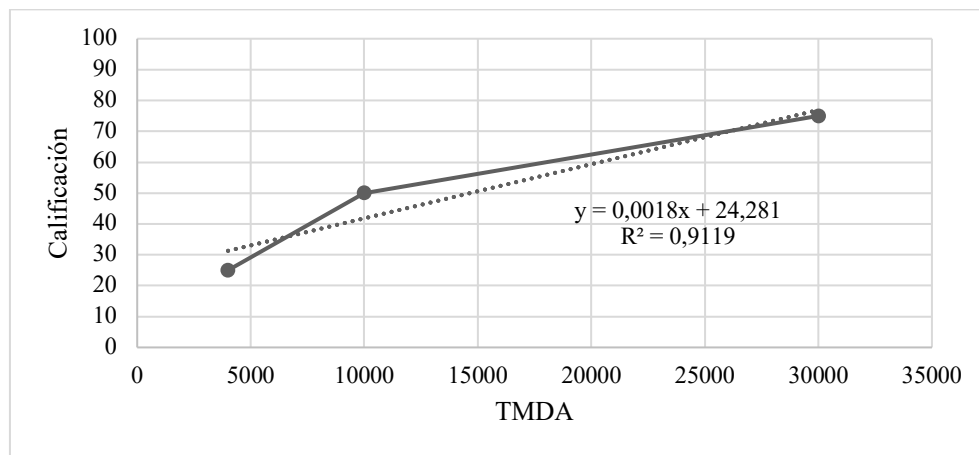


Figura 3.4 Transito medio diario anual

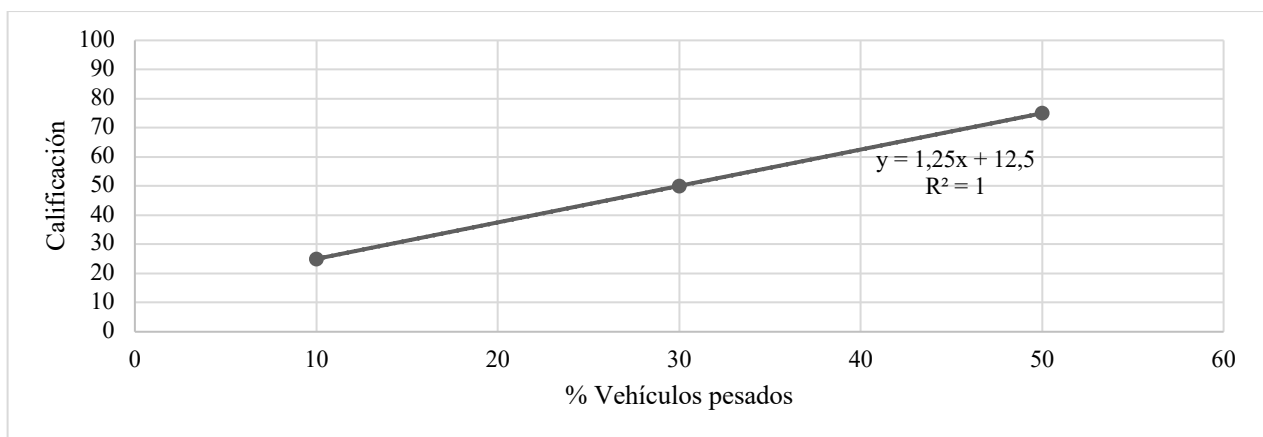


Figura 3.5 Porcentaje de vehículos pesados

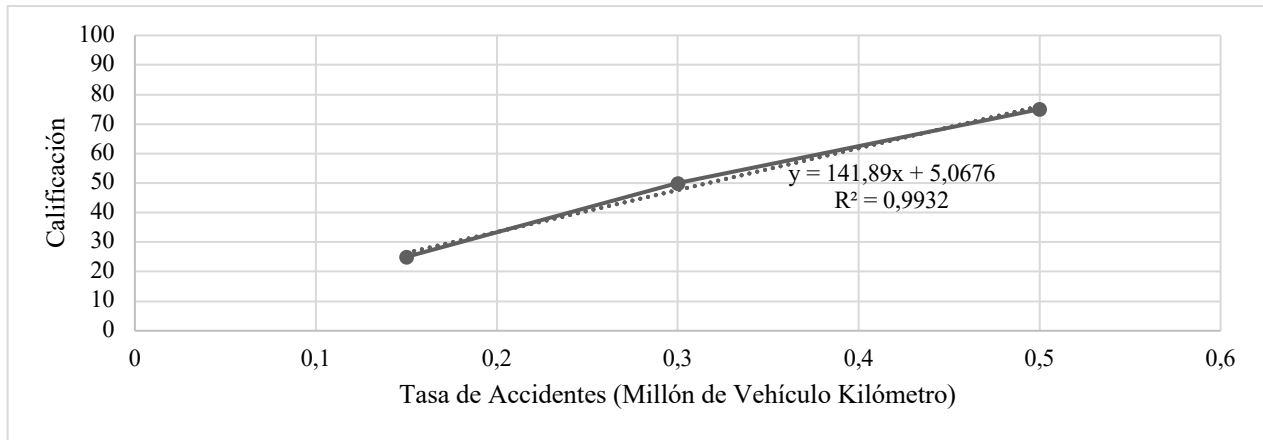


Figura 3.6 Tasa de accidentes

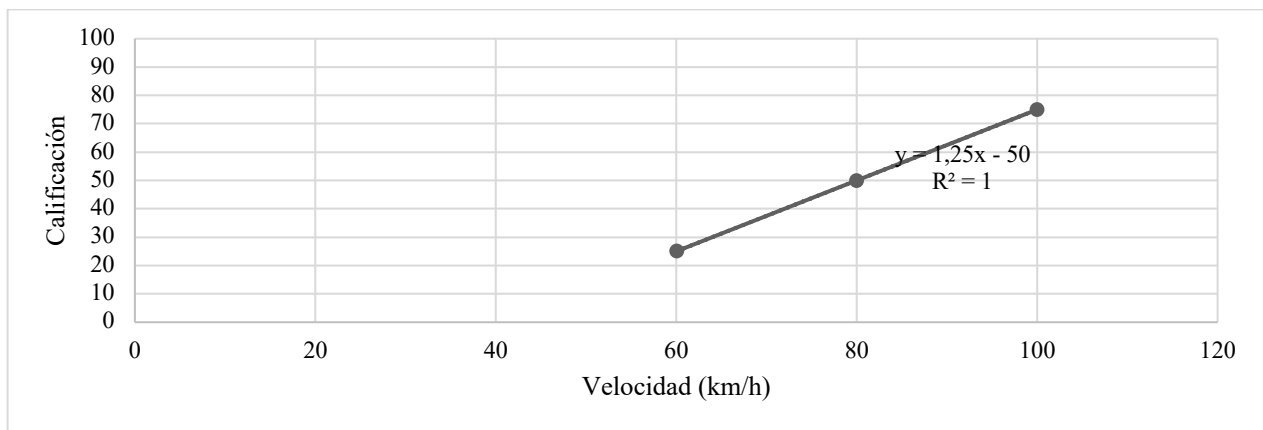


Figura 3.7 Límite de velocidad

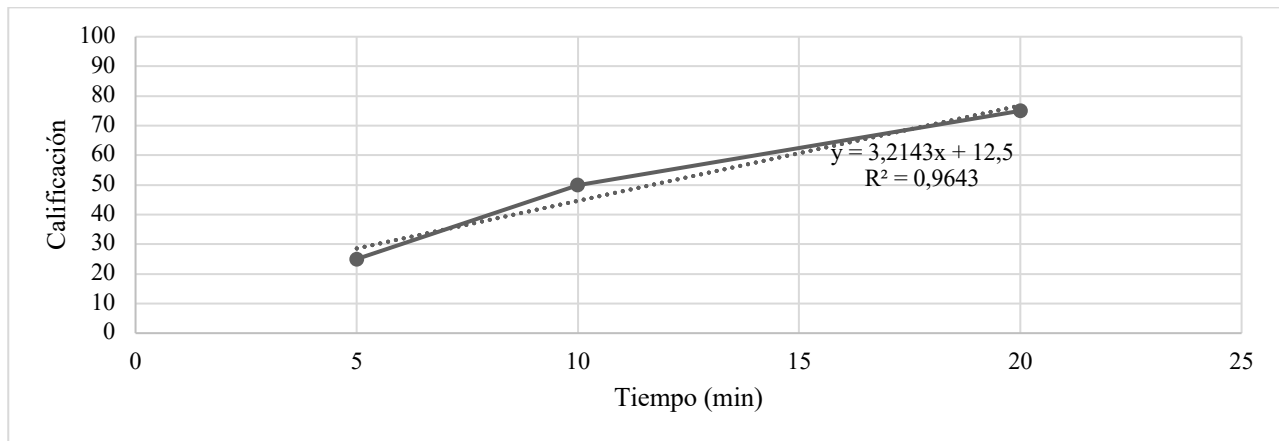


Figura 3.8 Tiempo de respuesta a emergencia

En la Tabla 3.2 se presentan todas las ecuaciones obtenidas para calificar cada una de las variables linealizadas

Tabla 3.2. Ecuaciones de las componentes del modelo

Componente	Calificación	
Longitud del túnel (m)	$0,05 \cdot \text{Longitud}$	$0\text{m} < \text{Longitud} < 1000\text{m}$
	$0,0125 \cdot \text{Longitud} + 37,5$	$\text{Longitud} > 1000\text{m}$
Resistencia al deslizamiento (SFC)	$-250 \cdot \text{SFC} + 150$	
Distancia a salida de emergencia (m)	$0,125 \cdot \text{Distancia} - 6,25$	
	$0,0018 \cdot \text{TMDA} + 24,281$	
% de vehículos pesados	$1,25 \cdot \% \text{ Vehículos Pesados} + 12,5$	
Tasa de accidentes	$141,89 \cdot \text{Tasa Accidentes} + 5,0676$	
Límite de Velocidad (km/h)	$1,25 \cdot \text{Límite de Velocidad} - 50$	
Tiempo de respuesta a emergencia (Min)	$3,2143 \cdot \text{Tiempo de Respuesta} + 12,5$	

3.5 Definición de distribución de probabilidades de variables cualitativas

Para llevar a cabo la simulación y comprender mejor el funcionamiento del modelo, fue necesario definir distribuciones de probabilidad para las seis variables no linealizables: Combinación de alineamientos, instalaciones de seguridad, iluminación, instalaciones de monitoreo, factores climáticos y gestión de vehículos con sustancias peligrosas. Estas distribuciones representan el comportamiento de las calificaciones obtenidas con el modelo de Wu.

La Tabla 3.3 especifica el tipo de distribución de probabilidad asignado a cada componente. La componente "combinación de alineamientos" se rige por una distribución uniforme ya que depende en gran medida de la geometría del terreno. Por otro lado, los "factores climáticos" también se modelan con una distribución uniforme debido a su dependencia de la ubicación del túnel, que puede estar situado en una zona con clima adverso o favorable.

En cuanto a las componentes "iluminación", "instalaciones de seguridad", "instalaciones de monitoreo" y "gestión de vehículos con sustancias peligrosas", se optó por una distribución triangular. Esto se debe a que existen estándares establecidos dentro de los requerimientos de estas variables, lo que permite definir rangos más específicos de probabilidad.

Tabla 3.3. Distribución de frecuencias de probabilidad

Componente	Distribución	Valor más probable	Valor Mínimo	Valor Máximo
Combinación de alineamientos Verticales y horizontales	Uniforme	x	0	100
Instalaciones de seguridad	Triangular	50	0	100
Iluminación	Triangular	30	0	100
Instalaciones de Monitoreo	Triangular	30	0	100
Factores climáticos	Uniforme	x	0	100
Gestión de Vehículos con sustancias peligrosas	Triangular	60	0	100

3.6 Simulación de escenarios

Para la evaluación de las variables de mayor influencia y mejor comprensión del modelo, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad mediante simulación utilizando el método Montecarlo con el software “Oracle Crystal Ball”. Esta técnica estadística y computacional, se emplea para comprender el comportamiento de sistemas complejos y prever resultados en escenarios donde la influencia de múltiples variables aleatorias dificulta el cálculo determinista exacto. Su utilidad radica especialmente en situaciones donde el problema en cuestión no puede resolverse mediante métodos analíticos convencionales.

Se realizaron dos escenarios, el primero ajusta las calificaciones R_{ij} de las variables cualitativas no linealizables y aplica las ecuaciones de linealización a las variables cuantitativas correspondientes. Y en el segundo se modifican tanto las calificaciones R_{ij} las variables cualitativas como los coeficientes γ_{ij} relacionados con todos los componentes. Las variables cuantitativas, por su parte, se mantienen establecidas mediante la aplicación de las ecuaciones de linealización correspondientes.

En la Figura 3.9 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del escenario número uno. Se destaca que la variable que ejerce la mayor influencia en los resultados del modelo es la combinación de alineamientos horizontales y verticales, representando un 52.7% de influencia. Además, se observa

un impacto limitado asociado a las instalaciones de monitoreo y seguridad en los resultados del modelo.

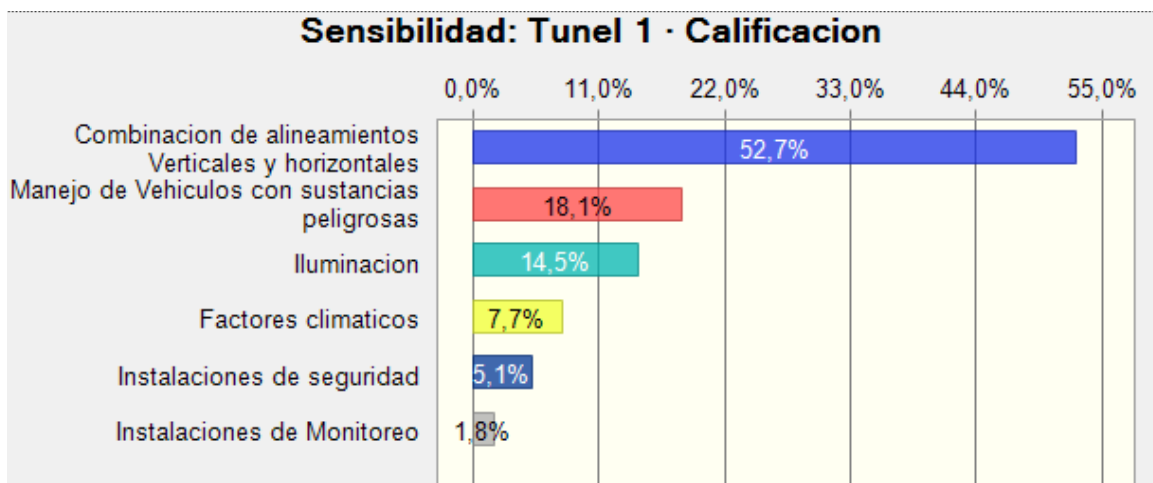


Figura 3.9 Análisis de sensibilidad escenario 1

En la Figura 3.10 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad del escenario número dos. En este análisis, se identificaron cuatro grupos distintos de influencia claramente marcados. Además, destaca el factor relacionado con el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA), el cual exhibe un 13.7% de influencia dentro de los resultados del modelo.

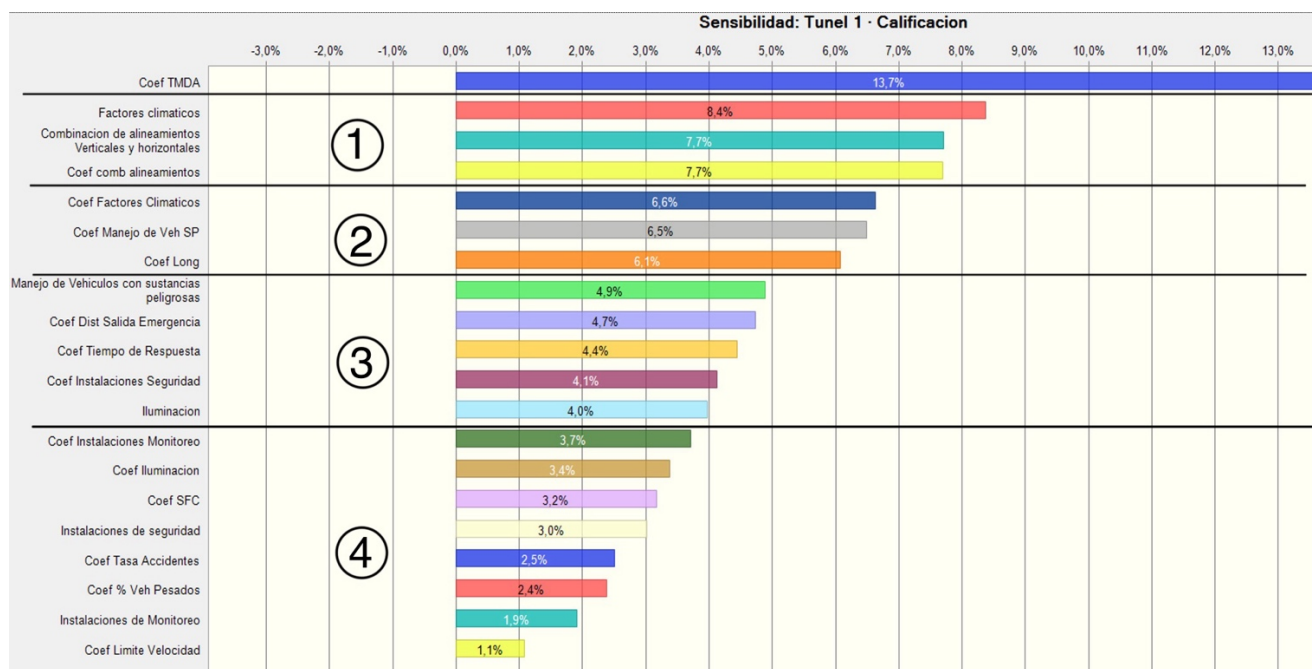


Figura 3.10 Análisis de sensibilidad escenario 2

Los dos escenarios presentan un análisis de sensibilidad sobre la seguridad vial en túneles carreteros, revelando los factores que más influyen en esta área crítica. En el escenario 1, se destaca la combinación de alineamientos verticales y horizontales como el factor más influyente, seguido por el manejo de vehículos con sustancias peligrosas y la iluminación. Estos resultados sugieren que la geometría de la carretera y la visibilidad son aspectos fundamentales para garantizar la seguridad en los túneles, especialmente en situaciones que implican vehículos con cargas peligrosas.

Por otro lado, en el escenario 2 se presenta una perspectiva ligeramente diferente. Aquí, el TMDA emerge como el factor más influyente, lo que indica que el volumen de tráfico en el túnel desempeña un papel crucial en su seguridad. Los factores climáticos también son significativos en esta simulación, subrayando la importancia de considerar las condiciones meteorológicas al diseñar medidas de seguridad para túneles carreteros. Sin embargo, la combinación de alineamientos verticales y horizontales aún conserva su importancia en este análisis.

Para recolectar información efectiva sobre las variables críticas que influyen en la seguridad vial en túneles carreteros, es fundamental dirigir los esfuerzos hacia aquellas áreas identificadas como más influyentes en los análisis de sensibilidad. En este sentido, se debería priorizar la recopilación de datos sobre la combinación de alineamientos verticales y horizontales, dado su papel central en ambas simulaciones. Asimismo, la iluminación dentro de los túneles emerge como un factor crucial, subrayando la importancia de obtener información detallada sobre los sistemas de iluminación existentes. Además, el manejo de vehículos con sustancias peligrosas y el volumen de tráfico, medido a través del TMDA, son aspectos esenciales que requieren una atención especial en la recolección de datos. Finalmente, considerar los factores climáticos y recopilar datos meteorológicos históricos ayudará a entender cómo las condiciones ambientales impactan la seguridad vial en los túneles.

3.7 Conclusiones

Las variables críticas dentro de este modelo incluyen la combinación de alineamientos verticales y horizontales, que exhiben un 52,7% de influencia en el escenario 1 y ocupan el tercer lugar en influencia en el escenario 2. Asimismo, la iluminación tiene un impacto significativo, con un 14,5% de influencia en los resultados del escenario 1. En el escenario 2, el Transito Medio Diario Anual (TMDA) emerge como el factor más influyente. Además, la gestión del tráfico de vehículos con cargas

peligrosas se identifica como otro aspecto crítico, con un 18,1% de influencia en el escenario 1. Estos hallazgos subrayan la importancia de recabar datos precisos sobre estos elementos para mejorar la seguridad vial en túneles carreteros.

CAPITULO 4 ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

4.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla la estrategia empleada para llevar a cabo la recopilación de datos destinada al modelo. El énfasis recae en la obtención de información específica relacionada con túneles concesionados y públicos, con el propósito de alimentar el modelo.

4.2 Muestra de túneles para el estudio

Para el estudio se excluyen túneles internacionales, aquellos designados patrimonio nacional y los de una sola vía de la Tabla A.4.1.1. En la Tabla 4.1 presenta el registro de 24 túneles a utilizar.

Tabla 4.1. Muestra de túneles

Túnel	Longitud (m)	Estado
1	2045	Concesionado
2	2543	Concesionado
3	2798	Concesionado
4	2800	Concesionado
5	2800	Concesionado
6	1215	Concesionado
7	1215	Concesionado
8	1808	Concesionado
9	1808	Concesionado
10	157	Concesionado
11	800	Concesionado
12	747	Concesionado
13	1550	Concesionado
14	1550	Concesionado
15	298	Concesionado
16	298	Concesionado
17	347	Publico
18	2183	Publico
19	320	Publico
20	440	Publico
21	245	Publico
22	245	Publico

23	240	Publico
24	793	Publico

4.3 Factores de infraestructura

4.3.1 Longitud del túnel

La longitud del túnel se obtiene del registro de registro obtenido mediante el catastro de túneles del anexo 4.1.

Tabla 4.2. Longitud túneles

Túnel	Longitud (m)	Túnel	Longitud (m)
1	2045	13	1550
2	2543	14	1550
3	2798	15	347
4	2800	16	298
5	2800	17	298
6	1215	18	2183
7	1215	19	320
8	1808	20	440
9	1808	21	245
10	157	22	245
11	800	23	240
12	747	24	793

4.3.2 Combinación de alineamientos verticales y horizontales

Para los túneles públicos, se recopiló la información mediante videos de conducción dentro de los túneles, lo que representó una evaluación directa en terreno. La verificación de estos datos se llevó a cabo mediante el uso del software *Google Earth*. Además, en aquellos casos en los que existían informes relacionados con la construcción de los túneles, se extrajo la información pertinente de dichos informes. En el caso de los túneles ubicados en autopistas concesionadas, la información se obtuvo a partir de las bases de licitación. Para corroborar y validar la información proporcionada, se utilizaron videos de la conducción dentro de los túneles. Los datos se encuentran resumidos en el anexo 4.2

4.3.3 Resistencia al deslizamiento (SFC)

El valor de la resistencia al deslizamiento (SFC) para los túneles concesionados se determina según las especificaciones de las bases de licitación, que establecen un mínimo de 0,4 para tramos rectos y 0,55 para curvas. En ausencia de informes semestrales, se asume el valor mínimo obligatorio para cada túnel. Para los túneles públicos, donde no se encontró registro de información de resistencia al deslizamiento con el equipo SCRIM, se estableció un valor fijo de 0,4. La información es expuesta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resistencia al deslizamiento (SFC)

Túnel	SFC	Túnel	SFC
1	0,4	13	0,4
2	0,4	14	0,4
3	0,4	15	0,35
4	0,4	16	0,4
5	0,4	17	0,4
6	0,4	18	0,35
7	0,4	19	0,35
8	0,4	20	0,35
9	0,4	21	0,35
10	0,55	22	0,35
11	0,55	23	0,35
12	0,55	24	0,35

4.3.4 Instalaciones de seguridad

Para los túneles públicos, se recopiló la información mediante videos de conducción dentro de los túneles, lo que representó una evaluación directa en terreno. La verificación de estos datos se llevó a cabo mediante el uso del software *Google Earth*. En el caso de los túneles ubicados en autopistas concesionadas, la información se obtuvo a partir de las bases de licitación. Los datos se encuentran resumidos en la anexo 4.2.

4.3.5 Iluminación

Para los túneles públicos, se recopiló la información mediante videos de conducción dentro de los túneles, lo que representó una evaluación directa en terreno. La verificación de estos datos se llevó a cabo mediante el uso del software *Google Earth*. En el caso de los túneles ubicados en autopistas

concesionadas, la información se obtuvo a partir de las bases de licitación. Los datos se encuentran resumidos en el anexo 4.2.

4.3.6 Distancia a salida de emergencia

Para los túneles públicos, se recopiló la información mediante videos de conducción dentro de los túneles, lo que representó una evaluación directa en terreno. La verificación de estos datos se llevó a cabo mediante el uso del software *Google Earth*. Además, en aquellos casos en los que existían informes relacionados con la construcción de los túneles, se extrajo la información pertinente de dichos informes. En el caso de los túneles ubicados en autopistas concesionadas, la información se obtuvo a partir de las bases de licitación. Para corroborar y validar la información proporcionada, se utilizaron videos de la conducción dentro de los túneles. Los datos se encuentran resumidos en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Distancia a salida de emergencia

Túnel	Distancia a Salida de emergencia (m)	Túnel	Distancia a Salida de emergencia (m)
1	2045	13	520
2	425	14	520
3	470	15	347
4	800	16	298
5	800	17	298
6	715	18	1500
7	715	19	320
8	200	20	440
9	200	21	245
10	157	22	245
11	400	23	240
12	375	24	793

Se observa una disparidad notable las distancias a las salidas de emergencia. Algunos túneles han sido diseñados con un elevado estándar de seguridad, caracterizándose por la presencia de galerías de escape cada 200 metros. Sin embargo, otros túneles no cumplen con los estándares mínimos establecidos en este criterio específico.

4.3.7 Instalaciones de monitoreo

Para los túneles públicos, se recopiló la información mediante videos de conducción dentro de los túneles, lo que representó una evaluación directa en terreno. La verificación de estos datos se llevó a cabo mediante el uso del software *Google Earth*. En el caso de los túneles ubicados en autopistas concesionadas, la información se obtuvo a partir de las bases de licitación. Los datos se encuentran resumidos en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Estado de instalaciones de monitoreo

Túnel	Estado	Túnel	Estado
1	Centro de control completo	13	Centro de control completo
2	Centro de control completo	14	Centro de control completo
3	Centro de control completo	15	sin instalaciones de monitoreo
4	Centro de control completo	16	sin instalaciones de monitoreo
5	Centro de control completo	17	sin instalaciones de monitoreo
6	Centro de control completo	18	Centro de control completo
7	Centro de control completo	19	cuenta con un centro de control, aunque carece de numerosos elementos para el monitoreo.
8	Centro de control completo	20	cuenta con un centro de control, aunque carece de numerosos elementos para el monitoreo.
9	Centro de control completo	21	sin instalaciones de monitoreo
10	Centro de control completo	22	sin instalaciones de monitoreo
11	Centro de control completo	23	sin instalaciones de monitoreo
12	Centro de control completo	24	sin instalaciones de monitoreo

La mayoría de los túneles concesionados cuentan con un elevado estándar de instalaciones de monitoreo, incluyendo un centro de control integrado con las herramientas de monitoreo. En cambio, varios de los túneles públicos carecen de instalaciones de monitoreo, lo que genera una brecha significativa de estándares entre los túneles públicos y los concesionados.

4.4 Factores ambientales

4.4.8 Transito medio diario anual

En el caso de los túneles públicos la información fue obtenida del Plan Nacional de censos proporcionado por (Ministerio de Obras Públicas, 2022), en el cual se especifica el TMDA en cada vía. En el caso de túneles concesionados el flujo de vehículos fue recolectado de los informes semestrales proporcionados a vialidad.

Para calcular el Tráfico Medio Diario Anual (TMDA), se sigue un proceso que implica la manipulación de los flujos vehiculares mensuales. En primer lugar, se divide el flujo vehicular de cada mes entre 2 para obtener el flujo por sentido. Posteriormente, este flujo por sentido se divide por la cantidad de días que tiene cada mes. Finalmente, se promedian todos estos flujos resultantes a lo largo de los meses para obtener el TMDA, proporcionando así una medida representativa del tráfico vehicular diario promedio a lo largo de todo el año. Matemáticamente, se expresa como:

$$TMDA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Flujo\ Mensual_i}{2 * Días\ en\ Mes_i} \tag{4.1}$$

Donde:

- n representa el número de meses considerados en el cálculo
- $Flujo\ Mensual_i$ es el flujo vehicular del mes i
- $Días\ en\ Mes_i$ es la cantidad de días en el mes i

Los datos de flujo se encuentran disponibles en el Anexo 4.2, mientras que los resultados del Tráfico Medio Diario Anual (TMDA) se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. transito medio diario anual

Túnel	TMDA	Túnel	TMDA
1	6411	13	6480
2	5176	14	7100
3	1417	15	6498
4	21887	16	11996
5	21887	17	6480

6	17845	18	9600
7	17845	19	9600
8	14408	20	9600
9	14259	21	14983
10	6480	22	14983
11	7100	23	2982
12	6480	24	1258

4.4.9 Porcentaje de vehículos pesados

En el caso de los túneles públicos la información fue obtenida del Plan Nacional de censos proporcionado por (Ministerio de Obras Públicas, 2022), en el cual se especifica la proporción de vehículos pesados que transitan por una vía. En el caso de túneles concesionados esta información fue recolectada de los informes semestrales proporcionados a vialidad. La información está expuesta en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Porcentaje de vehículos pesados

Túnel	Porcentaje de vehículos pesados (%)	Túnel	Porcentaje de vehículos pesados (%)
1	10,41	13	1,69
2	19,75	14	1,69
3	18,61	15	12,12
4	9,18	16	22,48
5	9,18	17	22,48
6	9,18	18	23,25
7	9,18	19	23,25
8	5,17	20	23,25
9	5,17	21	16,24
10	1,69	22	16,24
11	1,69	23	19,71
12	1,69	24	35,5

4.4.10 Factores climáticos

Para obtener datos sobre los Factores Climáticos en túneles públicos y concesionados, se utilizaron informes oficiales de la Dirección Meteorológica de Chile para la estación meteorológica más cercana a los túneles. Estos datos fueron complementados con información adicional recopilada de Weather Spark (Cedar Lake Ventures, n.d.) para tener una visión más completa y detallada del clima en la región de los túneles. Los datos recolectados están disponibles en el anexo 4.2.

Se observa que los túneles ubicados cerca de la costa, como los del camino La Pólvara, Jardín Botánico O, Jardín Botánico P y Pedro Galleguillos, experimentan un considerable número de días con niebla. Por otro lado, el túnel El Farellón, al encontrarse en la zona austral del país, está propenso a nevazones y lluvias intensas, mientras que el resto de los túneles, al situarse en la zona central del país, experimentan un clima menos adverso, lo que tiene un impacto menor en la seguridad vial.

4.5 Factores de gestión

4.5.11 Tasa de accidentes

La cantidad de accidentes fue recopilada a través de los datos proporcionados por la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (Conaset) correspondiente al año 2022, detallados en el anexo 4.2.

El cálculo de la tasa de accidentes se lleva a cabo mediante la aplicación de la ecuación 4.2.

$$R = \frac{C * 10^6}{TMDA * 365 * (L + 100)} \quad (4.2)$$

Donde:

- R es la tasa de accidentes para la sección de camino expresada en accidentes por millón vehículo-kilometro
- C es el total de accidentes en el periodo de estudio
- $TMDA$ es el Transito Medio Diario Anual
- L es la longitud del túnel

Nota. EL valor 100 dentro de la fórmula es para considerar la distancia de las zonas de entrada y salida del túnel.

Así se obtiene:

Tabla 4.8. Tasa de accidentes

Túnel	Tasa de Accidentes	Túnel	Tasa de Accidentes
1	0,17	13	0
2	0,15	14	0
3	0	15	0
4	0,1	16	0
5	0	17	0
6	0,1	18	0,13
7	0	19	0
8	0,05	20	0
9	0,05	21	0
10	0	22	0
11	0	23	0
12	0,28	24	5,49

4.5.12 Límite de velocidad

El límite de velocidad para túneles públicos está dado por la normativa de tránsito vigente del país, La velocidad de los túneles de obras concesionadas, varía. Ella puede ser determinada en las bases de licitación, en decretos o bien remitiéndose a las reglas del Manual de Carreteras del MOP.

Tabla 4.9. Límite de velocidad

Túnel	Límite de Velocidad (km/h)	Túnel	Límite de Velocidad (km/h)
1	50	13	80
2	60	14	80
3	100	15	70
4	90	16	100
5	90	17	100
6	90	18	60
7	90	19	40
8	80	20	40
9	80	21	70
10	80	22	70
11	80	23	60
12	80	24	40

En el contexto de las autopistas concesionadas que albergan túneles, se observa una variabilidad significativa en los límites de velocidad establecidos. Estos límites están condicionados por diversos factores, entre los cuales se destacan la propia naturaleza de la autopista, el estado específico de cada túnel, así como la antigüedad del mismo. Los rangos de valores de estos límites abarcan desde los 50 Km/h hasta los 100 Km/h.

4.5.13 Tiempo de respuesta a emergencia

En el caso de túneles públicos, no se dispone de información relacionada con esta estadística. Por otro lado, para los túneles concesionados, dicha información se encuentra publicada en los informes semestrales presentados al Ministerio de Obras Públicas.

Dado que no se disponen de informes específicos para cada túnel, se realizaron revisiones en las bases de licitación de concesiones de autopistas con túneles y en las bases de licitación de túneles independientes. Esto se hizo para establecer un tiempo estimado para la respuesta a emergencias. Se fijó un tiempo de 12 minutos para concesiones que solo abarcan túneles y, en el caso de concesiones que incluyen autopistas convencionales como túneles y para túneles públicos, se estableció un tiempo de respuesta de 35 minutos.

4.5.14 Gestión de vehículos con sustancias peligrosas

Toda la información concerniente a sustancias peligrosas está detallada en el Decreto 298 (Congreso de Chile, 1994). Según este decreto, se prohíbe el paso de vehículos con sustancias peligrosas en túneles con una longitud superior a 500 metros. En el caso de los túneles concesionados, cada concesión establece en su reglamento de servicio las normativas y procedimientos relacionados con el paso de vehículos que transportan sustancias peligrosas. El resumen de la información recolectada se encuentra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Reglamento gestión de vehículos con carga peligrosa

Túnel	Reglamento	Túnel	Reglamento
1	sin paso	13	sin paso
2	sin paso	14	sin paso
3	sin paso	15	Requiere Autorización
4	Requiere Autorización	16	Requiere Autorización
5	Requiere Autorización	17	Requiere Autorización
6	Requiere Autorización	18	Requiere Autorización
7	Requiere Autorización	19	Requiere Autorización
8	Requiere Autorización	20	Requiere Autorización
9	Requiere Autorización	21	Requiere Autorización
10	sin paso	22	Requiere Autorización
11	sin paso	23	Requiere Autorización
12	sin paso	24	Requiere Autorización

Se observa que ningún túnel permite el paso libre de vehículos con carga peligrosa, y en la mayoría de los casos, se requiere autorización previa. Este enfoque contribuye a mejorar la seguridad al transitar por los túneles.

4.6 Conclusiones

Los túneles en Chile exhiben una gran diversidad tanto en sus diseños, instalaciones y medidas de seguridad. Por un lado, los túneles concesionados sobresalen por su alto estándar de infraestructura y un sistema de seguridad avanzado, mientras que la mayoría de los túneles públicos muestran deficiencias en estas áreas.

El 71% de los túneles concesionados están equipados con sistemas de iluminación que se ajustan automáticamente, asegurando una visibilidad óptima para el conductor. En contraste, los túneles públicos carecen de este sistema automático e incluso algunos no cuentan con iluminación en absoluto, lo que representa un riesgo para la seguridad vial. Además, los túneles concesionados tienen instalaciones de seguridad operativas conectadas a un centro de control, una situación que contrasta con la de los túneles públicos, donde incluso la demarcación y señalización están en mal estado, generando mayores complicaciones para los conductores y resaltando la importancia de mantener y mejorar constantemente las medidas de seguridad.

La variedad en la infraestructura y medidas de seguridad de los túneles chilenos resalta la necesidad de una mayor inversión y atención en la mejora y mantenimiento de la seguridad vial en estas infraestructuras, con un énfasis particular en los túneles públicos. Este análisis subraya la importancia de mantener estándares elevados de seguridad y gestión para prevenir accidentes y garantizar un transporte seguro y eficiente en todo el país

CAPITULO 5 CALIFICACIONES DE NIVEL DE RIESGO

5.1 Introducción

En este capítulo, se exponen las calificaciones y el nivel de riesgo para la muestra de túneles utilizando los datos recopilados en el capítulo anterior y el desarrollo del modelo de Wu. Además, se presenta el análisis correspondiente.

5.2 Calificaciones globales y nivel de riesgo

En la Figura 5.1 se muestra un gráfico que presenta todas las calificaciones globales de la muestra de túneles seleccionada aplicando la metodología de Wu. Asimismo exhibe el nivel de riesgo asociado determinado por la Tabla 2.4. En el anexo 5.1 se encuentra una tabla resumen con las calificaciones globales y nivel de riesgo asociado.

La calificación global más baja fue de 18, mientras que la más alta fue de 57, con un promedio de 34. Un 83% de los túneles se sitúan en el rango de riesgo bajo, mientras que un 17% presentan un nivel de riesgo moderado. No se encuentra ningún túnel por encima de estos rangos, lo que refleja un nivel de seguridad muy elevado en los túneles del país.

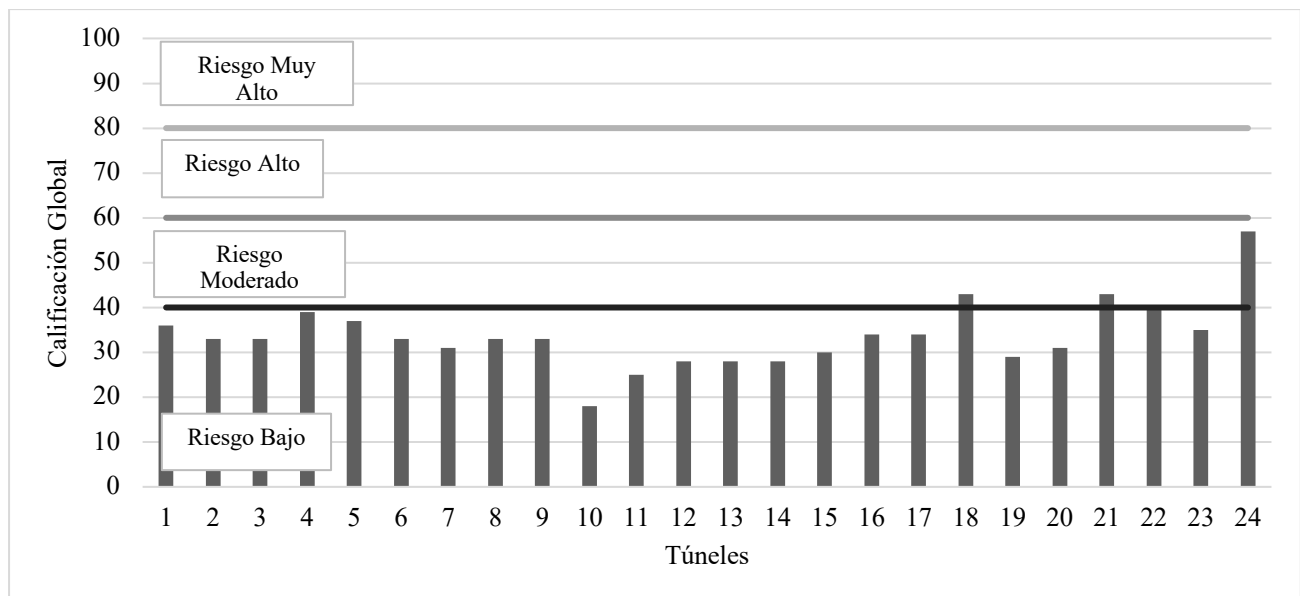


Figura 5.1 Calificaciones globales y nivel de riesgo para túneles carreteros

En el caso de los túneles concesionados evaluados, todos se sitúan dentro del rango de riesgo bajo, con un promedio de calificación global de 31. La calificación más baja registrada fue de 18, correspondiente al Túnel 10, mientras que la más alta fue obtenida por el Túnel 4, con una calificación de 39. Estas calificaciones bajas se atribuyen principalmente al alto estándar en iluminación, sistemas de seguridad y centros de control. Este análisis sugiere que, en el contexto actual, los túneles evaluados presentan un nivel satisfactorio de seguridad, respaldando la clasificación de riesgo actual.

En lo que respecta a los túneles públicos, la mitad de ellos se encuentra en el rango de riesgo bajo, mientras que la otra mitad presenta un riesgo moderado, con una calificación global promedio de 39. La calificación más baja se registró en el Túnel 19 con una puntuación de 29, mientras que la más alta fue obtenida por el Túnel 24, con una calificación de 57. La presencia significativa de túneles con riesgo moderado se atribuye a la escasa modernización de estas infraestructuras, donde la mayoría carece de las herramientas adecuadas de monitoreo y seguridad. Se destaca el caso del túnel 24, cuya iluminación apagada, junto con otros factores, influyó en la obtención de la calificación más alta entre todos los túneles evaluados.

5.3 Calificación individual factores de infraestructura

Para establecer la calificación individual de cada componente del modelo se siguen las reglas de puntuación establecidas en el Anexo 5.2.1

5.3.1 Longitud del túnel

En la Tabla 5.1 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de longitud. La calificación más baja es 8, correspondiente al Túnel 10, mientras que la más alta es 73 para el Túnel 5. El promedio de todas las calificaciones es de 42, con una desviación estándar de 24, indicando cierta variabilidad. Esto se debe a que la longitud está influenciada por las características específicas del obstáculo que el túnel busca superar.

Tabla 5.1. Calificaciones individuales longitud del túnel

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	63	9	60	17	15
2	69	10	8	18	65
3	72	11	40	19	16
4	73	12	37	20	22
5	73	13	57	21	12
6	53	14	57	22	12
7	53	15	17	23	12
8	60	16	15	24	40

5.3.2 Combinación de alineamientos verticales y horizontales

En la Tabla 5.2 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de combinación de alineamientos verticales y horizontales. La calificación más baja fue de 20, correspondiente al Túnel 16 debido a su trazado recto, mientras que la calificación más alta fue para el 21, debido a su ubicación en una zona con curvas, incluyendo una con un radio muy pequeño que fue mal diseñada al inicio del túnel, obteniendo una calificación de 100. El promedio de las calificaciones fue de 48, con una desviación estándar de 22, lo que indica que hay espacio para mejorar los trazados de nuevos túneles en el país.

Tabla 5.2. Calificaciones individuales combinación de alineamientos

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	85	9	55	17	20
2	50	10	50	18	85
3	50	11	50	19	20
4	40	12	50	20	40
5	40	13	55	21	100
6	20	14	55	22	75
7	20	15	20	23	50
8	55	16	20	24	50

5.3.3 Resistencia al deslizamiento (SFC)

En la Tabla 5.3 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de Resistencia al deslizamiento. La calificación más baja fue de 13, mientras que la más alta fue de 50. Esta componente, al no poder contar con datos exactos, posee una dispersión baja con una desviación estándar de 22 y un promedio de 22.

Tabla 5.3. Calificaciones individuales resistencia al deslizamiento

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	50	9	50	17	50
2	50	10	13	18	50
3	50	11	50	19	50
4	50	12	13	20	50
5	50	13	50	21	50
6	50	14	50	22	50
7	50	15	50	23	50
8	50	16	50	24	50

5.3.4 Instalaciones de seguridad

En la Tabla 5.4 se presentan de las calificaciones individuales correspondientes a la componente de instalaciones de seguridad. Se observa que los túneles que operan bajo concesiones con estándares más elevados, han obtenido una calificación de 0, reflejando un cumplimiento exhaustivo de los requisitos de seguridad. Por otro lado, en los túneles públicos más antiguos, se evidencia una escasez notable de elementos de seguridad, atribuible a la falta de modernización en estas infraestructuras. La calificación máxima alcanzada fue de 100, mientras que el promedio se situó en 31, con una desviación estándar de 42, subrayando así la marcada disparidad de estándares entre los túneles públicos y los concesionados.

Tabla 5.4. Calificaciones individuales instalaciones de seguridad

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	0	9	0	17	100
2	0	10	0	18	0
3	0	11	0	19	60
4	0	12	0	20	45
5	0	13	0	21	85
6	0	14	0	22	85

7	0	15	100	23	85
8	0	16	100	24	85

5.3.5 Iluminación

En la Tabla 5.5 se presentan de las calificaciones individuales correspondientes a la componente de iluminación. Se destaca que varios túneles bajo concesión están equipados con sistemas automáticos de control de iluminación, lo que les otorga una calificación de 0, indicando un cumplimiento óptimo en este aspecto. Por otro lado, los túneles de gestión pública no muestran dificultades significativas en la adaptación de su iluminación, tanto interior como exterior. Sin embargo, el túnel 24 se desvía de esta tendencia, presentando iluminación apagada, lo que resulta en una calificación de 95, indicando una situación excepcional respecto a la norma establecida.

Tabla 5.5. Calificaciones individuales iluminación

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	0	9	0	17	15
2	15	10	0	18	0
3	15	11	0	19	15
4	0	12	0	20	15
5	0	13	0	21	25
6	0	14	0	22	25
7	0	15	15	23	25
8	0	16	15	24	95

5.3.6 Distancia a salida de emergencia

En la Tabla 5.6 se presentan de las calificaciones individuales correspondientes a la componente de distancia a salida de emergencia. Se observa que la calificación más baja, de 13, corresponde al túnel 10, debido a su longitud relativamente corta. Es importante resaltar el alto estándar de los túneles 8 y 9, que cuentan con salidas de emergencia cada 200 m, reflejando una disposición favorable en términos de seguridad. Por otro lado, el túnel 1 carece de salidas de emergencia a pesar de su extensión, al igual que el túnel 18, que solo cuenta con una salida a lo largo de su trayecto, lo que resulta en una calificación de 100 para ambos casos. El promedio de calificación para esta métrica es de 52, con una desviación estándar de 29, lo que indica una variabilidad considerable entre los túneles evaluados. A pesar de esta dispersión, no se observa una diferencia significativa entre los túneles

gestionados bajo concesión y aquellos de gestión pública en cuanto al cumplimiento de las recomendaciones de distancias a las salidas de emergencia.

Tabla 5.6. Calificaciones individuales distancia a salida de emergencia

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	100	9	19	17	31
2	47	10	13	18	100
3	53	11	44	19	34
4	94	12	41	20	49
5	94	13	59	21	24
6	83	14	59	22	24
7	83	15	37	23	24
8	19	16	31	24	93

5.3.7 Instalaciones de monitoreo

En la Tabla 5.7 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de instalaciones de monitoreo. La mayoría de los túneles bajo concesión obtienen una calificación de 0, lo cual indica un cumplimiento satisfactorio de los estándares de monitoreo establecidos para garantizar la supervisión efectiva de las condiciones dentro del túnel. Por el contrario, en los túneles de gestión pública se observa una carencia notable de sistemas de monitoreo. Aunque en la ruta que engloba los túneles 18, 19 y 20 existe un centro de control completo, los túneles 19 y 20 carecen de herramientas suficientes para llevar a cabo un monitoreo adecuado. El promedio de calificación para esta métrica fue de 33, con una desviación estándar de 44, lo que subraya la marcada disparidad entre los estándares de monitoreo en los túneles públicos y concesionados.

Tabla 5.7. Calificaciones individuales instalaciones de monitoreo

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	0	9	0	17	100
2	0	10	0	18	0
3	0	11	0	19	60
4	0	12	0	20	60
5	0	13	0	21	80
6	0	14	0	22	80
7	0	15	100	23	100

8	0	16	100	24	100
---	---	----	-----	----	-----

5.4 Calificación individual factores ambientales

Para establecer la calificación individual de cada componte del modelo se siguen las reglas de puntuación establecidas en el Anexo 5.2.2.

5.4.1 Transito medio diario anual

En la Tabla 5.8 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de Tránsito Medio Diario Anual. La calificación menor fue de 27, mientras que la mayor fue de 64, con un promedio de 33 y una desviación estándar de 11. Esto nos indica que existe homogeneidad en la cantidad de vehículos que circulan por los distintos túneles del país.

Tabla 5.8. Calificaciones individuales transito medio diario anual

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	36	9	50	17	46
2	34	10	36	18	42
3	27	11	37	19	42
4	64	12	36	20	42
5	64	13	36	21	51
6	56	14	37	22	51
7	56	15	36	23	30
8	50	16	46	24	27

5.4.2 Porcentaje de vehículos pesados

En la Tabla 5.9 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de porcentaje de vehículos pesados. La calificación mínima registrada fue de 15, mientras que la máxima fue de 67, con un promedio de 29 y una desviación estándar de 11. Aunque la dispersión de los datos es relativamente pequeña, se observa un patrón discernible entre los túneles ubicados dentro de la ciudad, como el Túnel 8, 10 y 13, los cuales muestran una menor calificación debido a la menor presencia de vehículos pesados en comparación con los túneles interurbanos, que presentan una calificación más elevada en este aspecto.

Tabla 5.9. Calificaciones individuales porcentaje de vehículos pesados

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	26	9	19	17	41
2	37	10	15	18	41
3	36	11	15	19	41
4	24	12	15	20	41
5	24	13	15	21	33
6	24	14	15	22	33
7	24	15	28	23	37
8	19	16	41	24	57

5.4.3 Factores climáticos

En la Tabla 5.10 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de factores climáticos. Se observa que los túneles situados en proximidad a la costa, así como el túnel ubicado en el sector austral del país, son los únicos con factores climáticos que pueden influir en la seguridad vial. Específicamente, los túneles cercanos a la costa son más susceptibles a la presencia de niebla, mientras que el túnel ubicado en el sector austral enfrenta condiciones climáticas adversas como nevadas y lluvias extremas. La calificación promedio para esta métrica fue de 23, con una desviación estándar de 37.

Tabla 5.10. Calificaciones individuales factores climáticos

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	0	9	0	17	0
2	0	10	0	18	75
3	0	11	0	19	75
4	0	12	0	20	75
5	0	13	0	21	75
6	0	14	0	22	75
7	0	15	0	23	100
8	0	16	0	24	75

5.5 Calificación individual factores de gestión

Para establecer la calificación individual de cada componente del modelo se siguen las reglas de puntuación establecidas en el Anexo 5.2.3.

5.5.1 Tasa de accidentes

En la Tabla 5.11 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de tasa de accidentes. La calificación más baja registrada fue de 0, mientras que la más alta fue de 100 para el túnel 24. El promedio de calificación para esta métrica fue de 12, con una desviación estándar de 23. Es importante destacar que la información relacionada con esta componente se basa únicamente en los datos de accidentes proporcionados por CONASET. Sería beneficioso mejorar la calidad de estos datos incorporando la información recolectada por las concesiones, a la cual no se tuvo acceso para este informe, lo que podría proporcionar una visión más completa y precisa de la tasa de accidentes en los túneles evaluados.

Tabla 5.11. Calificaciones individuales tasa de accidentes

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	29	9	12	17	0
2	26	10	0	18	24
3	0	11	0	19	0
4	19	12	45	20	0
5	0	13	0	21	0
6	19	14	0	22	0
7	0	15	0	23	0
8	12	16	0	24	100

5.5.2 Límite de velocidad

En la Tabla 5.12 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de límite de velocidad. La calificación más baja registrada fue de 0, mientras que la más alta alcanzó los 75, con un promedio de 43 y una desviación estándar de 23. A partir de estos datos, se observa una tendencia donde los túneles bajo concesión presentan límites de velocidad más elevados en comparación con los túneles de gestión pública. Esta diferencia puede atribuirse a las potenciales mejores condiciones de seguridad y gestión que caracterizan a los túneles concesionados.

Tabla 5.12. Calificaciones individuales límite de velocidad

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	13	9	50	17	75
2	25	10	50	18	25

3	75	11	50	19	0
4	63	12	50	20	0
5	63	13	50	21	38
6	63	14	50	22	38
7	63	15	38	23	25
8	50	16	75	24	0

5.5.3 Tiempo de respuesta a emergencia

En la Tabla 5.13 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de tiempo de respuesta a emergencias. Se observa que la calificación mínima registrada fue de 51, mientras que la más alta alcanzó los 100, con un promedio de 82 y una desviación estándar de 24. Es importante destacar que el promedio tan elevado puede atribuirse a la falta de datos exactos para esta componente, lo que podría afectar la precisión de las calificaciones individuales y generar una mayor variabilidad en los resultados.

Tabla 5.13. Calificaciones individuales tiempo de respuesta a emergencia

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	100	9	51	17	100
2	51	10	51	18	100
3	51	11	51	19	100
4	100	12	51	20	100
5	100	13	51	21	100
6	100	14	51	22	100
7	100	15	100	23	100
8	51	16	100	24	100

5.5.4 Gestión de vehículos con sustancias peligrosas

En la Tabla 5.14 se presentan de las calificaciones individuales para la componente de gestión de vehículos con carga peligrosa. Se observa que la calificación más baja registrada fue de 0, mientras que la más alta alcanzó los 15, con un promedio de 10 y una desviación estándar de 7. Es importante resaltar que ningún túnel permite el paso libre de vehículos que transporten sustancias peligrosas, y no se aprecia ninguna diferencia significativa entre los túneles gestionados bajo concesión y aquellos de gestión pública en este aspecto.

Tabla 5.14. Calificaciones individuales gestión de vehículos con carga peligrosa

Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual	Túnel	Calificación individual
1	0	9	15	17	15
2	0	10	0	18	15
3	0	11	0	19	15
4	15	12	0	20	15
5	15	13	0	21	15
6	15	14	0	22	15
7	15	15	15	23	15
8	15	16	15	24	15

5.6 Conclusiones

Después de un análisis exhaustivo de las calificaciones y niveles de riesgo para la muestra de túneles carreteros utilizando los datos recopilados y el modelo desarrollado por Wu (2020), se ha observado una tendencia general hacia un alto nivel de seguridad en los túneles del país con una calificación promedio de 34. De los 24 túneles incluidos en la muestra, 20 se sitúan en el rango de riesgo bajo, lo que indica un nivel satisfactorio de seguridad en términos generales.

Los túneles bajo concesión exhiben calificaciones consistentemente bajas, con un promedio de 31, lo cual indica que todos operan en un nivel de riesgo bajo. Este resultado sugiere que se cumplen rigurosamente los estándares de seguridad y se lleva a cabo una gestión eficaz de las instalaciones y operaciones. Esta mejora se atribuye a la implementación de tecnologías avanzadas y a una inversión significativa en sistemas de iluminación, monitoreo y seguridad. En promedio, la iluminación alcanza una calificación promedio de 4, mientras que las instalaciones monitoreo y de seguridad obtienen una calificación promedio de 13, lo que contribuye a crear un entorno de conducción seguro y confiable para los usuarios.

Por otro lado, los túneles bajo gestión pública muestran una mayor variabilidad en sus calificaciones. Cuatro de ellos presentan una calificación que indica un riesgo moderado, mientras que los cuatro restantes muestran un riesgo bajo. Esta situación se debe principalmente a la falta de modernización de estas infraestructuras, lo que resulta en deficiencias en aspectos clave como la iluminación, con una calificación promedio de 27, las instalaciones de seguridad, con una calificación promedio de 68, y el monitoreo, con una calificación promedio de 73. Es crucial abordar estas deficiencias mediante la implementación de medidas de mejora y modernización para garantizar niveles óptimos de seguridad en todos los túneles.

CAPITULO 6 CONCLUSIONES

El documento se centró en la comprensión e implementación del modelo de Wu (2020) para evaluar la seguridad vial en una muestra de 24 túneles seleccionados a lo largo de Chile. Se realizaron simulaciones de dos escenarios para comprender el funcionamiento del modelo, seguido de la recopilación de datos sobre 14 componentes clave en cada túnel. Posteriormente, se asignaron calificaciones a cada uno, lo que permitió determinar su nivel de riesgo. Se observa una tendencia hacia niveles elevados de seguridad, con 20 de los 24 túneles clasificados en un nivel de riesgo bajo. Sin embargo, se identificó una disparidad significativa entre los túneles gestionados por concesiones, todos con riesgo bajo, y los de dominio público, con cuatro clasificados en riesgo moderado y cuatro en riesgo bajo. La comparación entre ellos reveló discrepancias notables, especialmente en áreas como la iluminación, los sistemas de seguridad y los centros de control.

A pesar de la existencia de distintos modelos de evaluación de seguridad en túneles carreteros, Chile carece de un modelo estandarizado. El modelo propuesto por Wu ofrece una valiosa aproximación inicial debido a su simplicidad y aplicabilidad, destacando la evaluación de 14 componentes distintos, agrupados en factores que abarcan la infraestructura, la gestión y los aspectos ambientales. Esta herramienta puede ser utilizada para gestionar riesgos en túneles carreteros, tanto en proyectos nuevos como en infraestructuras existentes, siendo de apoyo en la toma de decisiones para mejorar áreas específicas y visualizar el impacto potencial en la seguridad vial.

Al profundizar en el modelo de Wu, se observa una linealización de ocho componentes, lo que facilita la calificación y minimiza la ambigüedad. Aspectos como la combinación de alineamientos verticales y horizontales, la calidad de la iluminación, la gestión del tráfico de vehículos con cargas peligrosas y el Tráfico Medio Diario Anual (TMDA) se destacan como críticos dentro de este modelo, subrayando la importancia de recabar datos precisos sobre estos elementos.

A pesar de ofrecer una visión inicial, este estudio ha identificado algunas limitaciones, como la falta de acceso completo a la información sobre túneles gestionados por concesiones y la ausencia de informes detallados sobre los túneles de dominio público. Estas limitaciones resaltan la necesidad de obtener informes completos y llevar a cabo evaluaciones más exhaustivas en terreno.

Se propone llevar a cabo futuras investigaciones que incluyan la calibración de los coeficientes del modelo, la subdivisión de componentes y la incorporación de nuevos elementos relacionados con los peligros de incendios y la ventilación del túnel, así como la inclusión de coeficientes relacionados con el comportamiento de los usuarios en la vía y la segmentación de los tipos de accidentes, contribuirán a perfeccionar la evaluación de la seguridad vial en túneles, impulsando el desarrollo y la aplicación de mejores prácticas en este ámbito crucial para la seguridad de la infraestructura vial.

CAPITULO 7 REFERENCIAS

- Amundsen, F. H., & Raner, G. (2000). Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(1), 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00024-9](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00024-9)
- B. Kohl, K. Botschek, & R. Hörhan. (2007, March 23). Austrian Risk Analysis for Road Tunnels Development of a new Method for the Risk Assessment of Road Tunnels. *FIRST INTERNATIONAL TUNNEL SAFETY FORUM for ROAD AND RAIL*.
- Bassan, S. (2016). Overview of traffic safety aspects and design in road tunnels. *IATSS Research*, 40(1), 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2016.02.002>
- Caliendo, C., De Guglielmo, M. L., & Guida, M. (2013). A crash-prediction model for road tunnels. *Accident Analysis & Prevention*, 55, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.024>
- Cartes, P., Chamorro, A., & Echaveguren, T. (2021). Seismic risk evaluation of highway tunnel groups. *Natural Hazards*, 108(2), 2101–2121. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04770-1>
- Cedar Lake Ventures, I. (n.d.). *Weatherspark*. <https://Es.Weatherspark.Com/>
<https://es.weatherspark.com/>
- Conaset. (2022). *Siniestros de tránsito en rutas de Chile*. https://Mapas-Conaset.Opendata.Arcgis.Com/Datasets/87edd2b1e9f54b9fa995910058c92998_0/Explore?Location=-33.838945%2C-70.708786%2C12.73.
- Congreso de Chile. (1994, November 25). *Decreto 298*. <https://Www.Bcn.Cl/Leychile/Navegar?IdNorma=12087>.
- Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas. (n.d.). *Nómina de Túneles Chilenos*. <https://Vialidad.Mop.Gob.Cl/Areasdevialidad/Tuneles/Paginas/Default.aspx>.
- Dirección General de Concesiones. (n.d.). *Concesiones en Operación*. https://Concesiones.Mop.Gob.Cl/Proyectos/Paginas/Proyectos_operacion.aspx.
- Dirección Meteorológica de Chile. (n.d.). *Red de Estaciones Automáticas DGAC-DMC*. <https://Climatologia.Meteochile.Gob.Cl/Application/Index/MenuTematicoEmas>.
- European Union. (2004). *Minimum requirements for tunnel safety in the trans-European road network*. <https://Www.Boe.Es/Doue/2004/167/L00039-00091.Pdf>.
- Lemke, K. (2000). Road Safety in Tunnels. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1740(1), 170–174. <https://doi.org/10.3141/1740-22>

- Lu, H., Shang, T., Bao, J., & Liang, Y. (2022). Traffic Safety Optimization Strategy of Mountainous Highway Tunnel Based on GA-SVR Visual Load Model. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2022/6768300>
- Ministerio de Obras Publicas. (2022). *Plan Nacional de Censos*. <https://sitministerial.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=91ae27f8339a44f2bf0790da6ca47d36>.
- Ministerio de obras públicas. (2023). *MANUAL DE RECOMENDACIONES DE ESTÁNDARES GENERALES BÁSICOS PARA PROYECTOS DE TÚNELES VIALES*. <https://vialidad.mop.gob.cl/Biblioteca/tuneles.pdf>
- Nussbaumer Cornelia, & Austrian Road Safety Board. (2007). *COMPARATIVE ANALYSIS OF SAFETY IN TUNNELS*. <https://es.scribd.com/document/635574419/Nussbaumer-COMPARATIVE-ANALYSIS-OF-SAFETY-IN-TUNNELS>
- SWOV. (2011). *The road safety of motorway tunnels*. https://swov.nl/system/files/publication-downloads/fs_tunnels_uk_archived.pdf
- Wu, H. (2020). Evaluation Techniques for Traffic Safety of Operating Highway Tunnels. *E3S Web of Conferences*, 145, 02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502027>

CAPITULO 8 ANEXOS

Anexo 4.1 Catastro de túneles carreteros en Chile

La tabla A.4.1.1 muestra los 34 túneles carreteros dentro del territorio chileno. De estos, 17 son concesionados, 2 funcionan como pasos internacionales hacia Argentina, 3 están designados como monumentos nacionales, mientras que el resto son públicos (Cartes et al., 2021; Ministerio de Obras Públicas, n.d.; Dirección General de Concesiones, n.d.)

Tabla A.4.1.1 Túneles chilenos (Cartes et al., 2021; Ministerio de Obras Públicas, n.d.; Dirección General de Concesiones, n.d.)

Nombre	Longitud (m)	Estado
Chacabuco	2045	Concesionado
El Melón 1	2543	Concesionado
El Melón 2	2798	Concesionado
Lo prado 1	2800	Concesionado
Lo prado 2	2800	Concesionado
Zapata 1	1215	Concesionado
Zapata 2	1215	Concesionado
San Cristóbal A	1808	Concesionado
San Cristóbal B	1808	Concesionado
Manquehue 1	157	Concesionado
Manquehue 2 izquierdo	800	Concesionado
Manquehue 2 derecho	747	Concesionado
Chamisero 1	1550	Concesionado
Chamisero 2	1550	Concesionado
La Calavera A	298	Concesionado
La Calavera B	298	Concesionado
Angostura	347	Publico
La Pólvora 1	2183	Publico
La Pólvora 2 (Loma Larga)	320	Publico
La Pólvora 3 (Las Animas)	440	Publico
Jardín Botánico O (Los Gemelos)	245	Publico
Jardín Botánico P (Los gemelos)	245	Publico
El Farellón (cobertizo)	240	Publico
Pedro Galleguillos	793	Publico
Puclaro	370	Publico (1 Vía)
La Grupa	1.279	Publico (1 Vía)

Las Raíces	4528	Publico (1 Vía)
La Pólvora T1A	165	Túnel de Emergencia
Cristo Redentor	1564	Paso Internacional
Caracoles	1460	Paso Internacional
Recto	142	Monumento Histórico
Curvo	212	Monumento Histórico
Las Astas	787	Monumento Histórico
Las Palmas	980	Monumento Histórico

Anexo 4.2 Datos recolectados de túneles chilenos

En este anexo se presentan los datos recolectados para el capítulo 4. En la Tabla A.4.2.1 se detallan minuciosamente los datos relativos a la combinación de alineamientos en términos verticales y horizontales. La Tabla A.4.2.2 muestra información detallada sobre la infraestructura de iluminación. Asimismo, en la Tabla A.4.2.3 se exhibe un registro pormenorizado de las instalaciones destinadas a la seguridad. A través de la Tabla A.4.2.4, se presenta un análisis detallado del flujo vehicular según su dirección. Las Tablas A.4.2.5 a A.4.2.14 comparten información valiosa sobre número de días del año con datos meteorológicos relevantes en distintas estaciones. Finalmente, la Tabla A.4.2.15 destaca el número de accidentes en túneles carreteros para el año 2022.

Tabla A.4.2.1. Catastro de combinación alineamientos verticales/horizontales

Túnel	Descripción	Túnel	Descripción
1	Túnel bidireccional recto con una pendiente del 3,5% y una curva antes de la recta de entrada	13	Túnel unidireccional con curvas bien diseñadas, aproximación en curva, sin bahías de estacionamiento y con una pequeña berma
2	Túnel unidireccional con pendiente del 2,93%, curvas pequeñas para romper la monotonía, una curva antes de la entrada y bahías de estacionamiento	14	Túnel unidireccional con curvas bien diseñadas, aproximación en curva, sin bahías de estacionamiento y con una pequeña berma
3	Túnel unidireccional con curva previa a la entrada, curvas pequeñas para evitar monotonía, pendiente del 3,43%, y cuenta con bahías de estacionamiento	15	Túnel unidireccional recto con aproximación en recta en subida
4	Túnel unidireccional recto con una leve curva al final, sin bahías de estacionamiento y con una pendiente del 1,7%	16	Túnel unidireccional recto con entrada en una recta en subida
5	Túnel unidireccional recto con una leve curva al final, sin bahías de estacionamiento y con una pendiente del 1,7%	17	Túnel unidireccional recto con entrada en una curva

6	Túnel unidireccional recto con una pendiente del 1,8%, con entrada en una recta larga y presencia de berma dentro del túnel	18	Túnel bidireccional con bahías de estacionamiento, entrada y salida en curva. La entrada/salida se encuentra en una subida en la parte de Valparaíso
7	Túnel unidireccional recto con una pendiente del 1,8%, con entrada en una recta larga y presencia de berma dentro del túnel	19	Túnel bidireccional recto con entrada en recta
8	Túnel unidireccional en forma de 'S' con pendiente del 2,5%, entrada y aproximación en curva. Dispone de bahías de estacionamiento y confluyen dos calles que comparten la misma entrada mediante divisores de flujo	20	Túnel bidireccional curvo con cambio de pendiente al interior y aproximación en recta
9	Túnel unidireccional en forma de 'S' con pendiente del 2,5%, entrada en una recta. Dispone de bahías de estacionamiento	21	Túnel unidireccional con aproximación en recta, entrada marcada por una curva muy pronunciada y salida directa hacia otra curva
10	Túnel bidireccional curvo con separadores de flujo y entrada en una recta	22	Túnel unidireccional recto con aproximación en una curva descendente
11	Túnel unidireccional curvo con entrada ubicada en una pequeña curva	23	Túnel bidireccional curvo aproximación en una recta
12	Túnel unidireccional curvo con entrada ubicada en una pequeña curva	24	Túnel bidireccional recto con entrada en una recta en subida

Tabla A.4.2.2. Catastro de iluminación

Túnel	Estado	Túnel	Estado
1	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	13	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante
2	La iluminación no se ajusta de manera automática, cuenta con niveles preestablecidos y no presenta problemas de adaptación	14	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante
3	La iluminación no se ajusta de manera automática, cuenta con niveles preestablecidos y no presenta problemas de adaptación	15	Iluminación estándar sin problemas de adaptación
4	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	16	La iluminación no se ajusta de manera automática, cuenta con niveles preestablecidos y no presenta problemas de adaptación
5	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	17	La iluminación no se ajusta de manera automática, cuenta con niveles preestablecidos y no presenta problemas de adaptación
6	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	18	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante
7	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de	19	Iluminación estándar sin problemas de adaptación

	adaptación, y se realiza una fiscalización constante		
8	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	20	Iluminación estándar sin problemas de adaptación
9	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	21	Existen algunos problemas con la adaptación al momento de ingresar al túnel
10	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	22	Existen algunos problemas con la adaptación al momento de ingresar al túnel
11	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	23	Iluminación estándar sin problemas de adaptación
12	Los niveles de iluminación se ajustan automáticamente, sin problemas de adaptación, y se realiza una fiscalización constante	24	Iluminación apagada

Tabla A.4.2.3. Catastro de instalaciones de seguridad

Túnel	Estado	Túnel	Estado
1	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	13	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control
2	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	14	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control
3	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	15	Demarcaciones en mal estado, no se visualiza ningún elemento de seguridad adicional
4	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	16	Demarcaciones en buen estado, no se visualiza ningún elemento de seguridad adicional
5	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	17	Demarcaciones en buen estado, no se visualiza ningún elemento de seguridad adicional
6	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	18	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control
7	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	19	Posee cámaras al inicio, demarcación en buen estado
8	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	20	Posee semáforos, y cámaras al inicio, demarcación en buen estado
9	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	21	La demarcación se encuentra en mal estado, posee señales de curva fuera del túnel, la entrada del túnel está marcada.
10	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	22	La demarcación se encuentra en mal estado, la entrada del túnel está marcada.

11	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	23	Solo posee señales de curva, demarcación en mal estado
12	El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control	24	Barreras a los costados de la entrada, demarcación en buen estado

Tabla A.4.2.4. Flujo vehicular por sentido

Túnel/Mes	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1	180819	173784	202954	196835	205788	186554	191273	198281	195542	205991	194602	200742
2	164662	223664	173292	162757	138994	105449	135593	138563	117892	144642	153631	216915
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144642	153631	216915
4	804419	721367	675498	640490	630260	587173	649319	622698	618159	674627	634686	698493
5	804419	721367	675498	640490	630260	587173	649319	622698	618159	674627	634686	698493
6	688857	620294	546541	518111	498766	469221	531117	495505	494871	549681	507749	564762
7	688857	620294	546541	518111	498766	469221	531117	495505	494871	549681	507749	564762
8	391127	336390	459929	421839	438467	451642	439686	470839	438446	454444	464805	480152
9	412009	314268	443664	453709	471215	486347	446778	454188	409284	424218	433890	445531
10	168096	133503	217694	210292	210664	199612	182008	204073	190938	209952	211449	222996
11	190119	144092	255478	243075	248244	214352	191328	220112	202436	217286	232629	228984
12	168096	133503	217694	210292	210664	199612	182008	204073	190938	209952	211449	222996
13	168096	133503	217694	210292	210664	199612	182008	204073	190938	209952	211449	222996
14	190119	144092	255478	243075	248244	214352	191328	220112	202436	217286	232629	228984
15	268916	252834	205359	193802	185124	167853	195202	173611	180916	184019	166328	185887
16	604813	551279	442396	423893	392346	379207	431433	393236	311678	134283	130584	158567

Tabla A.4.2.15. Número de Accidentes en Túneles
Carreteros Año 2022(Conaset, 2022)

Túnel	Total
1	2
2	2
3	0
4	5
5	0
6	2
7	0
8	1
9	1
10	0
11	0
12	1
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	1
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	2

Anexo 5.1 Calificaciones globales de los túneles chilenos

En esta sección se presentan las calificaciones de los túneles obtenidas en el capítulo 5. En la Tabla A.5.1.1 muestra la calificación global obtenida y el nivel de riesgo asociado.

Tabla A.5.1.1. Calificaciones Globales y Nivel de Riesgo en Túneles Carreteros

Túnel	Calificación	Riesgo
1	36	Riesgo Bajo
2	33	Riesgo Bajo
3	33	Riesgo Bajo
4	39	Riesgo Bajo
5	37	Riesgo Bajo
6	33	Riesgo Bajo
7	31	Riesgo Bajo
8	33	Riesgo Bajo
9	33	Riesgo Bajo
10	18	Riesgo Bajo
11	25	Riesgo Bajo
12	28	Riesgo Bajo
13	28	Riesgo Bajo
14	28	Riesgo Bajo
15	30	Riesgo Bajo
16	34	Riesgo Bajo
17	34	Riesgo Bajo
18	43	Riesgo Moderado
19	29	Riesgo Bajo
20	31	Riesgo Bajo
21	43	Riesgo Moderado
22	40	Riesgo Moderado
23	35	Riesgo Bajo
24	57	Riesgo Moderado

Anexo 5.2 Metodología de puntuación propuesta

En este anexo, se proporciona una explicación detallada acerca de la metodología de puntuación aplicada a cada componente del modelo. Este proceso de puntuación desentraña las métricas y criterios utilizados para evaluar el desempeño de cada aspecto del modelo, permitiendo una mejor comprensión.

Anexo 5.2.1 Factores de Infraestructura

5.2.1.1 Longitud del Túnel

Se refiere a la distancia entre la boca de entrada y la boca de salida de un túnel, medida en metros. La calificación de esta componente se realiza a través de la aplicación de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.1.2 Combinación de Alineamientos Verticales y Horizontales

Se refiere a la integración y diseño conjunto de las características geométricas tanto en términos de elevación (alineamientos verticales) como en términos de dirección y curvatura (alineamientos horizontales). Este enfoque busca lograr una transición fluida y segura para los conductores, considerando la pendiente de la vía, la presencia de curvas horizontales, y otros elementos geométricos relevantes. Se busca minimizar cambios abruptos en la elevación y dirección, optimizando la visibilidad, la capacidad de maniobra de los vehículos, y reduciendo la fatiga del conductor.

La calificación para esta componente en túneles se establece como:

- Calificación de 100: La entrada está próxima a curvas, existen curvas horizontales sin cumplir con normativas, varios puntos de cambio de pendiente a lo largo del túnel. En el caso de túneles largos no se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y no existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 85: La entrada está próxima a curvas, existen curvas horizontales sin cumplir con normativas, la pendiente es excesiva dentro del túnel. En el caso de túneles largos no se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y no existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 75: La entrada está próxima a curvas. El túnel se encuentra en terreno con pendiente pronunciada. Cumple con las normativas en curvas horizontales. En el caso de túneles largos no se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y no existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 65: La entrada está próxima a curvas. El túnel se encuentra en terreno con pendiente pronunciada. Cumple con las normativas en curvas horizontales. En el caso de túneles largos se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y no existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 55: La entrada está próxima a curvas. El túnel posee una pendiente entre el 3,5-4 %. Cumple con las normativas en curvas horizontales. En el caso de túneles largos se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y no existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 50: La entrada está próxima a curvas. El túnel cuenta con una pendiente adecuada (no superior al 3,5 %). Cumple con las normativas en curvas horizontales. En el caso de túneles largos se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 40: La entrada está en una recta. El túnel cuenta con una pendiente adecuada (no superior al 3,5 %). Cumple con las normativas en curvas horizontales. En el caso de túneles largos se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 20: El túnel se encuentra en terreno llano o moderadamente inclinado. Cumple con las normativas de elevación y distancia en curvas horizontales. En el caso de túneles largos se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y existen bahías de estacionamiento de emergencia.

- Calificación de 0: La entrada no está próxima a curvas horizontales o verticales. El túnel se encuentra en terreno llano. No hay curvas horizontales dentro del túnel. En el caso de túneles largos se incorporan curvas horizontales para romper la monotonía del trazado y existen bahías de estacionamiento de emergencia

Nota: Si el túnel es bidireccional y no cuenta con separadores de flujo, se deben agregar 10 puntos a la calificación.

5.2.1.3 Resistencia al deslizamiento (SFC)

La resistencia al deslizamiento en pavimentos se refiere a la capacidad de una superficie de carretera para proporcionar fricción suficiente entre los neumáticos de los vehículos y la carretera, con el fin de prevenir el deslizamiento o derrape durante condiciones adversas como lluvia, nieve o hielo. El *Sideways-force Coefficient* (SFC) es una medida de la resistencia al deslizamiento que se obtiene una maquina SCRIM. La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.1.4 Instalaciones de seguridad

Las instalaciones de seguridad en un túnel abarcan el conjunto integral de medidas y dispositivos implementados para garantizar condiciones seguras durante la circulación de vehículos y personas. Incluyen, pero no se limitan a, sistemas de iluminación normal, iluminación de seguridad y de emergencia, generadores y baterías de respaldo, ventilación adecuada, postes SOS, galerías de evacuación, altavoces, cámaras de vigilancia, semáforos, señales verticales y horizontales, barreras físicas, bahías de estacionamiento y paneles de información variable. Estas instalaciones no solo buscan prevenir accidentes, sino también facilitar la evacuación en casos de emergencia, asegurar la

orientación adecuada para la conducción y proporcionar herramientas para un control de velocidad seguro.

La calificación para esta componente se establecen como:

- Calificación de 100: El túnel carece de cualquier elemento de seguridad, incluyendo protección, ayudas a la conducción (demarcaciones) y control de velocidad.
- Calificación de 85: Aunque hay algunas instalaciones presentes, no proporcionan una cobertura completa, lo que resulta en un riesgo elevado.
- Calificación de 75: Dentro del túnel existen elementos para la seguridad, pero en el portal del túnel (entrada) no tiene la protección necesaria (barreras y/o semáforos) ni control de velocidad.
- Calificación de 60: Dentro del túnel existen elementos para la seguridad, pero en el portal del túnel (entrada) no tiene la protección necesaria (barreras y/o semáforos) o control de velocidad.
- Calificación de 45: Falta de orientación para la conducción (señales informativas y mensajería variable), bahías de estacionamiento y zonas de emergencia.
- Calificación de 35: El túnel cuenta con elementos de ayuda para la orientación de conducción pero carece de bahías de estacionamiento o zonas de emergencia.
- Calificación de 15: El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando.
- Calificación de 0: El túnel posee todas las instalaciones de seguridad funcionando a la perfección conectadas a un centro de control.

5.2.1.5 Iluminación

La iluminación en un túnel se refiere al sistema de luminarias y dispositivos de iluminación instalados en el interior de la infraestructura subterránea para proporcionar niveles adecuados de luz. La iluminación en un túnel es esencial para mantener altos estándares de seguridad vial al mejorar la visibilidad, reducir riesgos de accidentes y proporcionar condiciones óptimas para la conducción.

La calificación para esta componente se establecen como:

- Calificación de 100: El túnel no cuenta con ningún sistema de iluminación, lo que representa un riesgo extremadamente alto.
- Calificación de 95: La iluminación del túnel está apagada aumentando significativamente el riesgo de accidentes.
- Calificación de 80: Se observan deficiencias notables en la iluminación, como áreas con baja visibilidad o luminarias en mal estado, generando riesgos moderados para la seguridad.
- Calificación de 74: Existe la presencia de *Black hole y/o White hole Effect* y se observan deficiencias notables en la iluminación, como áreas con baja visibilidad o luminarias en mal estado.
- Calificación de 65: Existe la presencia de *Black hole y/o White hole Effect*..
- Calificación de 45: Existen problemas moderados de adaptación a la luz, pero la iluminación general se mantiene a un nivel aceptable, permitiendo condiciones de conducción seguras en la mayoría de las áreas del túnel.
- Calificación de 30: La iluminación es generalmente adecuada, aunque pueden existir algunos problemas menores de adaptación a la luz en ciertas áreas.
- Calificación de 25: Existen pocos problemas de adaptación a la luz dentro del túnel.

- Calificación de 15: La iluminación es óptima y contribuye a una excelente visibilidad en todo el túnel.

- Calificación de 0: La iluminación se gestiona de manera automática y eficiente, garantizando condiciones seguras para la conducción en todas las áreas del túnel.

5.2.1.6 Distancia a Salida de Emergencia

En ausencia de galerías o salidas de emergencia/evacuación/escape, se hace referencia a la distancia entre las bocas del túnel. Cuando existen salidas de emergencia, se refiere a la distancia máxima entre una de las bocas del túnel y la salida de emergencia, o la distancia entre múltiples salidas de emergencia, medidas en metros. La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.1.7 Instalaciones de Monitoreo

Las instalaciones de monitoreo dentro de un túnel son sistemas integrales diseñados para recopilar y analizar datos con el propósito de supervisar las condiciones operativas y de seguridad. Estas instalaciones incluyen una variedad de sensores y dispositivos que se distribuyen estratégicamente a lo largo del túnel para medir parámetros clave, como la calidad del aire, la velocidad de los vehículos, la iluminación, los accidentes, la detección de gases, etc.

Las herramientas de monitoreo a tener en cuenta incluyen cámaras con sistema de circuito cerrado de televisión (CCTV), un sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI), opacímetros, detectores de concentración de gases, luminancímetros, un centro de control, etc.

La calificación para esta componente se establecen como:

- Calificación de 100: el túnel no cuenta con ninguna herramienta de monitoreo , representando un riesgo máximo debido a la ausencia de información en tiempo real sobre las condiciones del túnel.
- Calificación de 80: Existe al menos una herramienta de monitoreo, pero su capacidad está limitada o su cobertura es parcial, lo que resulta en un riesgo significativo.
- Calificación de 60: Dos tipos de herramientas de monitoreo están operativas al 100%, proporcionando una cobertura más extensa y mejorando la capacidad de respuesta, pero aún sin cubrir todos los aspectos críticos.
- Calificación de 40: Tres tipos de herramientas de monitoreo están completamente funcionales, ofreciendo una visión integral, aunque con algunas áreas de mejora.
- Calificación de 20: Cuatro tipos de herramientas de monitoreo están operativas al 100%, proporcionando una cobertura completa y eficiente de todas las condiciones dentro del túnel.
- Calificación de 0: El túnel cuenta con un centro de control totalmente operativo, conectado a todas las herramientas de monitoreo del túnel. En este centro, se visualiza de manera integral toda la información pertinente, y se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento, sin ningún equipo dañado. Este centro opera sin interrupciones, ofreciendo servicio las 24 horas del día.

Anexo 5.2.2 Factores de Ambientales

5.2.2.1 Transito Medio Diario Anual (TMDA)

El TMDA se utiliza para describir la cantidad promedio de tráfico que pasa por un punto específico de una carretera durante un año medida en vehículos equivalentes, La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

Para este estudio, los datos de TMDA fueron recopilados para el año 2022 o 2021.

5.2.2.2 Porcentaje de Vehículos Pesados

Se refiere al porcentaje del flujo compuesto por camiones, buses y otros vehículos grandes con respecto al flujo total de la autopista, expresado en porcentaje. La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.2.3 Factores Climáticos

Las condiciones climáticas ejercen una influencia significativa en la seguridad dentro de un túnel. La lluvia intensa puede propiciar deslizamientos de tierra y aumentar el riesgo de inundaciones, mientras que la presencia de nieve y hielo crea condiciones resbaladizas y reduce la visibilidad, aumentando la posibilidad de accidentes. Fuertes ráfagas de viento plantean riesgos de vuelco, especialmente para vehículos de mayor altura. La niebla reduce drásticamente la visibilidad, dificultando la respuesta a emergencias.

La calificación para esta componente se establecen como:

- Calificación 100: El túnel enfrenta condiciones climáticas extremas, como lluvias intensas constantes, nevadas frecuentes con formación de hielo, fuertes ráfagas de viento persistentes y niebla densa continua
- Calificación de 75: El túnel está posee condiciones climáticas que incluyen lluvias intensas frecuentes, nevadas y formación de hielo frecuentes, fuertes ráfagas de viento y niebla intensa frecuente.
- Calificación de 50: El túnel se enfrenta a eventos climáticos desafiantes, como lluvias intensas, de manera ocasiona.
- Calificación de 25: En el túnel los eventos climáticos adversos son poco frecuentes

- Calificación de 0: En el túnel los eventos climáticos adversos son extremadamente raros

Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

Anexo 5.2.3 Factores de Gestión

5.2.3.1 Tasa de accidentes

La Tasa de Accidentes por millón de vehículo kilómetro es una métrica utilizada para cuantificar la frecuencia de accidentes de tráfico en relación con la distancia recorrida por los vehículos. Se calcula dividiendo el número total de accidentes por la cantidad de vehículo kilómetros recorridos, expresados en millones. La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.3.2 Límite de Velocidad

El límite de velocidad es la velocidad máxima permitida legalmente para los vehículos que transitan por dicha vía, medido en kilómetros por hora. La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.3.3 Tiempo de Respuesta a Emergencia

El tiempo de respuesta a emergencias dentro de un túnel se refiere al lapso de tiempo necesario para que los servicios de emergencia y/o equipos de respuesta lleguen al lugar de un incidente, medido en minutos. La calificación de esta componente se realiza a través de la ecuación específica proporcionada en la Tabla 3.2, Si la calificación supera el límite de 100, se deberá fijar esta calificación en 100.

5.2.3.4 Gestión Vehículos con Sustancias Peligrosas

Comprende el conjunto de estrategias, procesos y controles implementados para garantizar un transporte seguro, eficiente y ambientalmente responsable de materiales y productos clasificados como sustancias peligrosas.

La calificación para esta componente se establecen como:

- Calificación de 100: Permiso sin restricciones para el paso de vehículos con sustancias peligrosas.
- Calificación de 70: Limitación de la peligrosidad y cantidad de sustancias en el túnel.
- Calificación de 40: Permisos en franjas horarias específicas para la circulación de vehículos con sustancias peligrosas.
- Calificación de 24: Requiere autorización previa de las autoridades para la circulación de estos vehículos.
- Calificación de 15: Requiere autorización previa y cuenta con una franja horaria restringida para la circulación de vehículos con sustancias peligrosas.
- Calificación de 0: Prohibición total de la circulación de vehículos con sustancias peligrosas.

Anexos digitales

1. Sensibilización de modelo Wu 2020.xlsx
2. Clasificación de variables y modelo Wu 2020.xlsx

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento: Departamento de Ingeniería Civil

Carrera: Ingeniería Civil

Nombre del memorista: Mario Andrés Volpi Urbina

Título de la memoria: Diagnóstico de la seguridad vial en túneles carreteros

Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía: Tomás Echaveguren Navarro

Profesor(es) Revisor(es): Juan Carrasco Montagna

Concepto :

Calificación :

Resumen
<p>Existen diversos métodos de evaluación para medir la seguridad vial en túneles carreteros, sin embargo, en Chile, no se emplea ninguno de ellos, lo que ha resultado en la ausencia de una evaluación del nivel de riesgo en estos espacios. Por ende, esta investigación se enfoca en comprender e implementar el modelo de Wu (2020). Este modelo, estructurado en forma de checklist, abarca 14 componentes distribuidos en las categorías de infraestructura, gestión y factores ambientales.</p> <p>El estudio inició con la simulación de dos escenarios para comprender el funcionamiento del modelo, logrando linealizar 8 componentes y aumentar así la replicabilidad de las calificaciones obtenidas. Se determinó que la combinación de alineamientos verticales y horizontales, la iluminación, la gestión del tráfico de vehículos con cargas peligrosas y el Transito Medio Diario Anual (TMDA) son variables críticas dentro de este modelo, destacando la importancia de recabar datos precisos sobre estos elementos, lo que permitió focalizar los esfuerzos en la recolección de información específica para los componentes más críticos. La adquisición de</p>

datos se llevó a cabo tanto para túneles concesionados como públicos. Para los primeros, se utilizaron principalmente bases de licitación y reglamentos de servicio, mientras que para los túneles públicos, se enfrentaron dificultades debido a la falta de información fácilmente accesible, lo que requirió visitas a terreno, consultorías y análisis de noticias.

los túneles carreteros en Chile presentan un índice de riesgo bajo, con una calificación promedio de 34. Los túneles concesionados poseen un alto estándar, con calificaciones sobresalientes, con una calificación promedio de 31 indicando un nivel de riesgo bajo. Mientras que cuatro de los ocho túneles públicos poseen un nivel de riesgo moderado con una calificación promedio de 39, esto debido a que en algunos no existían instalaciones de monitoreo o la falta de herramientas de seguridad, siendo urgente la modernización y actualización de estos para llegar a un nivel de seguridad mayor.