

MARCO METODOLÓGICO DE LA PLATAFORMA DE GESTION DE RIESGO EN EL TRANSPORTE DE CARGA (PATGER)

Tomás Echaveguren, Universidad de Concepción, techaveg@udec.cl
Nicolás Flores Inostroza, Universidad de Concepción, nicolasanflore@udec.cl
Pablo Cartes, Universidad de Concepción, pablocartes@udec.cl
Gustavo Jiménez-Ramos, Universidad de Concepción, gustavjimenez@udec.cl
Juan Carrasco, Universidad de Concepción, juancarrasco@udec.cl

RESUMEN

En el marco del Decenio para la Acción 2011-2020, Chile elaboró la Política Nacional de Seguridad de Tránsito bajo la premisa de cero muertes en accidentes de tránsito. Un objetivo de la política es contar con infraestructura vial segura. PATGER contribuye a dicho objetivo al estimar el riesgo de siniestros fatales en términos de la infraestructura vial. El artículo describe el modelo conceptual de PATGER, en su esquema general y los modelos desarrollados durante 20 años por el laboratorio GESITRAN (Gestión de Sistemas de Transporte). Se resumen los modelos empleados y su integración para estimar el riesgo y las posibles medidas de reducción de riesgo.

Palabras clave: vehículos pesados, seguridad vial, indicadores de riesgo

SUMMARY

Within the Decade for Action 2011-2020 framework, Chile developed the National Traffic Safety Policy under the premise of zero deaths in traffic accidents. One objective of the policy is to have safe road infrastructure. PATGER contributes to this objective by estimating the risk of fatal crashes regarding road infrastructure. The article describes the PATGER conceptual model in its general outline and the models developed over 20 years by the GESITRAN (Transportation Systems Management) laboratory. The models and their integration to estimate risk and possible risk reduction measures are summarized.

Keywords: heavy vehicles, road safety, risk indices

1 INTRODUCCIÓN

Chile se adscribió al Decenio para la Acción 2011 – 2020 de las Naciones Unidas, con la misión de reducir en un 20 % las fatalidades en siniestros de tránsito. En el último periodo del decenio (año 2017), Chile promulgó la Política Nacional de Seguridad de Tránsito (PNST), tomando como base los conceptos de visión cero, sistema seguro y los 5 pilares para la seguridad vial propuestos por Naciones Unidas: gestión de seguridad vial, vías de tránsito y movilidad más seguras, vehículos más seguros, usuarios de las vías de tránsito más seguros y respuesta tras accidentes. En el 2021 se dio inicio al nuevo decenio para la acción 2021 – 2030, en el cual las naciones renovaron sus compromisos de reducción de fatalidades en este decenio. Con la nueva PNST, Chile se autoimpone una meta ambiciosa: cero fallecidos en siniestros de tránsito.

Los siniestros en carreteras concentran el 60% de las fatalidades en el país. De ellos, el 35% ocurre en los costados de los caminos. En los últimos 10 años, Bio Bio concentró el 13% de los fallecidos del país en siniestros de tránsito y el 8% en carretera, situándose como la tercera región con más fallecidos en carreteras. En el transporte de carga, la tasa nacional de siniestros varió entre 25 y 31 siniestros/1000 camiones entre el 2005 y 2021 con una tasa de crecimiento media de 0,2 siniestro/1000 vehículos de transporte de carga por año, concentrando un 13% en la región.

Los siniestros de tránsito impactan no solamente a las personas, sino que también al transporte terrestre como parte integrante de las cadenas logísticas asociadas a carga y pasajeros, limitando la posibilidad de contar, en la región, con una red logística eficiente. Las consecuencias son múltiples: pueden existir víctimas fatales, aumentan los tiempos de viaje, se pierde carga, se interrumpe la circulación, entre otros efectos negativos. En el transporte de pasajeros el principal impacto es el daño a la vida de las personas. En ambos casos también existe pérdida de material rodante que es necesario recuperar o sustituir.

Desde el punto de vista del operador, la infraestructura es una condición de borde, por lo cual la adopción de medidas de seguridad se circunscribe al vehículo y al conductor. En este sentido, la seguridad es un atributo diferenciador de la movilidad en la red de transporte, puesto que se aboca a limitar la presencia de factores que contribuyen a los siniestros de tránsito. Existen diversas herramientas normativas y tecnológicas que contribuyen a este propósito.

Desde el punto de vista normativo, la norma ISO 39001 introduce estrategias para que los operadores de transporte adopten el modelo de sistema seguro en su operación. La actual tecnología de seguimiento de flota mediante GPS, dispositivos de control anti rollover on-line y sistemas de frenos auxiliares, contribuyen a la circulación segura del transporte de carga. Sin embargo, todos estos instrumentos tienen en común la necesidad de contar con información acerca del nivel de riesgo presente en las carreteras. Dicha información permite definir, por ejemplo, geocercas (velocidad controlada por GPS), alimentar los sistemas de información on-line para prevenir accidentes por deslizamiento o vuelco en curvas, recomendar marchas y uso de sistema de frenos especiales en pendientes de bajada, entre otros aspectos, reduciendo así la posibilidad de error humano que desencadene o participe de un siniestro de tráfico en carretera.

Desde el punto de vista de una agencia vial, conocer el nivel de riesgo de siniestros de tránsito presentes en la infraestructura, permite focalizar la inversión y la gestión de seguridad en base a

evidencia. El riesgo asociado al factor infraestructura generalmente se mide en base a índices o a número esperado de accidentes. Los índices más conocidos son los de iRAP, IASP y RSI. El programa iRAP utiliza un índice de clasificación por categorías (de 1 a 5 estrellas) que refleja el nivel de seguridad asociado a una carretera. Las carreteras de 1 estrella representan el mayor riesgo de accidente para los usuarios de la vía, mientras que las de 5 estrellas representan el menor riesgo (carreteras muy seguras) (Daidone *et al.*, 2023). El índice evalúa características tales como separación de calzadas, diseño geométrico de la vía, intersecciones y enlaces, estado del pavimento, estado de zonas laterales, señalización y características operativas de la vía.

El índice desarrollado por el proyecto IASP, estima el nivel de riesgo en una carretera a partir del diseño geométrico, de inspecciones de seguridad vial y de las condiciones de operación de la vía. Estos aspectos los cuantifica en indicadores de exposición (FE), severidad de accidentes (FSA) frecuencia de accidentes (FFA), los que multiplicados determinan el índice de riesgo IS. Araya (2017) testeó este índice en Chile en una muestra reducida de rutas. Mientras mayor sea IS, menor es el nivel de seguridad de la vía (Cafiso *et al.*, 2007).

El *Road Safety Index* (RSI) del proyecto de la Comunidad Europea RANKERS, estima el nivel de seguridad de una carretera evaluando seis componentes asociados a la infraestructura vial: trazado geométrico, cruces y accesos, zonas de adelantamiento, costados del camino, pavimento y consistencia del diseño geométrico. El índice califica el nivel de seguridad con notas de 1 a 4, siendo 1 riesgo alto y 4 riesgo bajo. Su formulación permite identificar tramos de la carretera con deficiencias en su infraestructura, asociadas directamente a la seguridad que la vía proporciona a los usuarios (Ramos *et al.*, 2008).

Este marco metodológico incluye el desarrollo de una arquitectura general del sistema, incluyendo sus entradas y salidas y la discusión detallada de los modelos de consistencia operacional (Domínguez, 2019), de riesgo de deslizamiento y vuelco (de Solminihaç *et al.*, 2007; Cruz y Echaveguren, 2019), de peligrosidad de costados del camino (Rivera y Echaveguren, 2014), geométrico de carreteras (Cartes *et al.*, 2019), individualmente e integrados en un índice de riesgo vial (Cheuquepal, 2022). Se muestra adicionalmente el modelo de levantamiento geométrico de ejes viales necesario para la configuración de información base. Todos estos modelos han sido calibrados y validados en las regiones de Ñuble y Bio Bio. Los modelos individuales se integran en el modelo de cálculo de riesgo para proporcionar índices de riesgo sectorizados.

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PATGER

2.1 Componentes de PATGER

La plataforma PATGER se configura en base a los ocho componentes que se muestran en la Figura 1.

2.2 Datos de entrada

Los datos de entrada necesarios para estimar el índice de riesgo son de diversa naturaleza. Por un lado, se utiliza el inventario de la red vial, obtenido de la geodatabase de la red oficial única (ROU)

de la Dirección de Vialidad. El tráfico (TMDA) se obtiene del Plan Nacional de Censos de la Dirección de Vialidad, a partir del cual a cada arco de la red se le asigna TMDA, composición vehicular y tasa de crecimiento media. Para el levantamiento geométrico de la ROU se utilizan dos medios de captura de datos.

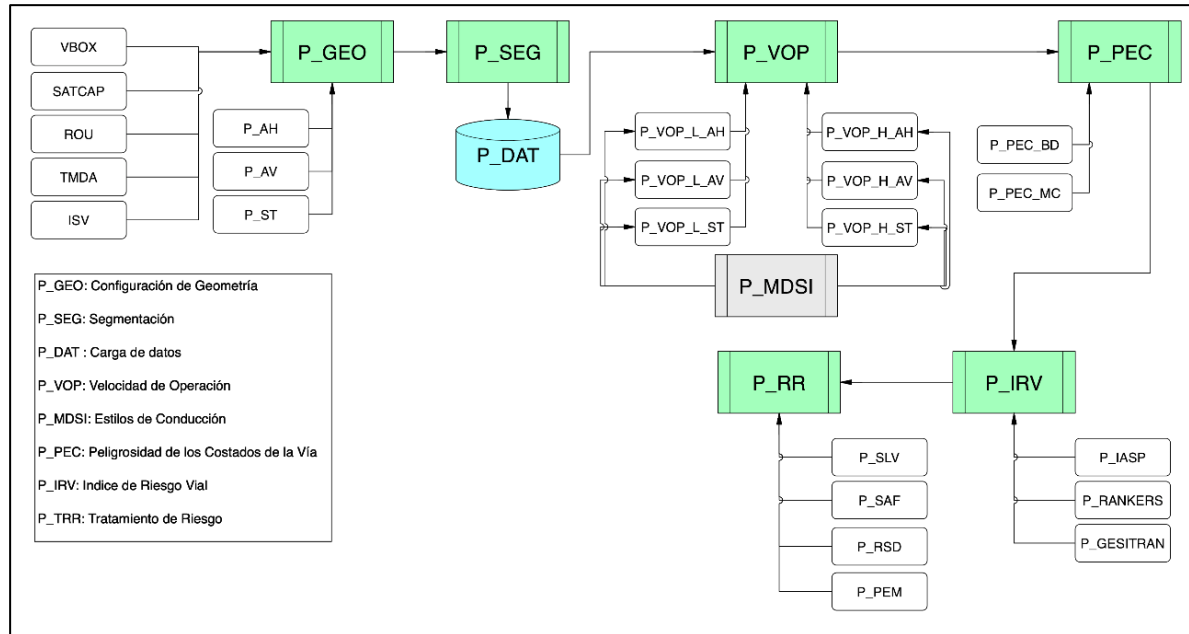


Figura 1: Diagrama de procesos de PATGER

Por un lado, se utilizan GPS RTK de 10Hz a partir de lo cual se obtiene posición, azimuth, distancia y elevación de las rutas. Esta información es generada con los equipos VBOX y SATCAP. Finalmente, las características físicas y operacionales de las carreteras se obtienen aplicando el procedimiento de inspección de seguridad vial de Cafiso et al. (2007), adaptado para condiciones locales por Araya (2017) y de Ramos et al. (2008), adaptado para condiciones locales por Cheuquepal (2022). Esta información se utiliza en los procesos que se describen en la sección siguiente.

2.3 Procesos de cálculo

Los procesos de cálculo son secuenciales. En el proceso P_GEO, se retro-calcula la geometría del trazado geométrico para los planos geométricos: alineamiento horizontal, alineamiento vertical y sección transversal. En el caso de alineamiento horizontal, se desarrolló un software basado en el procedimiento de retro-cálculo de Aburto (2015). En el caso del alineamiento vertical, se utiliza el algoritmo de Cartes et al. (2022) y los resultados de Ortiz-Morales et al. (2023). El algoritmo de retro-cálculo de sección transversal se encuentra en desarrollo. Utiliza el análisis de imágenes geo-referenciadas de sección transversal obtenidas con VideoVBOX.

En el proceso P_SEG se realiza una segmentación semiautomática, destinada a identificar en el trazado geométrico los elementos geométricos sobre los cuales, posteriormente, se calculan velocidades, índices de riesgo y medidas de tratamiento de riesgo. El algoritmo de segmentación

actualmente se realiza exógenamente usando el software desarrollado para el retro-cálculo de geometría horizontal.

En el proceso P_VOP se calculan las velocidades de operación para vehículos livianos y pesados. En curvas horizontales aisladas y sucesivas se utiliza el modelo de Echaveguren y Díaz (2013), Echaveguren et al. (2015) y Peña (2017) para vehículos livianos, y los modelos de Sáez (2001) para vehículos pesados y buses. En curvas verticales se utiliza el modelo de Cartes et al. (2022), de Sanhueza (2021) y Cancino (2022). En pendientes uniformes ascendentes se utiliza el modelo de Arellano et al. (2015), y para pendientes descendentes se utiliza el modelo de descenso con marcha controlada desarrollado en el laboratorio GESITRAN. Ambos modelos son para vehículos pesados. Adicionalmente, en rectas con baja pendiente, se utiliza el modelo de Flores (2020). Cabe resaltar, que el modelo de Cartes et al. (2022) y el procedimiento de Flores (2020) son sensibles a los estilos de conducción. Puesto que este parámetro depende del conductor, es necesario incorporar esta variable en el resto de los modelos. Los estilos de conducción se obtienen mediante el procedimiento de valoración subjetiva de González et al. (2018). Para lograr parametrizar los estilos de conducción se requiere contrastar las diferencias en telemetrías obtenidas con conductores cuyo estilo de conducción se encuentra estimado. Este aspecto se encuentra actualmente en desarrollo.

En el proceso P_PEC se calcula la peligrosidad de los costados del camino, segmento a segmento y en cada sentido de tránsito. Para ello se utiliza el índice de peligrosidad de Rivera y Echaveguren (2014). Este índice se encuentra calibrado en la región del Bio Bio y permite calcular la peligrosidad para caminos bidireccionales y multipistas, en rectas y curvas horizontales.

En el proceso P_IRV se calculan índices de riesgo en base a tres métodos. El método IASP de Cafiso et al. (2007) adaptado para Chile por Araya (2017); el índice de riesgo de RANKERS elaborado por Ramos et al. (2008) adaptado para Chile por Cheuquepal (2022); e indicadores de riesgo específicos desarrollados por el laboratorio GESITRAN. Dentro de estos últimos se cuentan los modelos integrados de análisis de consistencia de Cárdenas-Aguilar y Echaveguren (2015), de Soto (2016) y Domínguez (2019), aplicable a curvas horizontales; el modelo de pérdida de visibilidad en curvas verticales sucesivas de Parra y Echaveguren (2016); el índice de riesgo en pendientes descendentes de Echaveguren et al. (2012); y los modelos de riesgo de rollover de vehículos pesados para cargas sólidas de Cruz y Echaveguren (2019) y de Valeria (2019) para cargas líquidas; en pendientes ascendentes se utiliza el modelo de pendiente crítica de Echaveguren y Carrasco (2015) y el modelo de exposición desarrollado por Reed (2015).

Finalmente, en el proceso P_RR se incluyen modelos que permiten determinar posibles medias de abatimiento de riesgos altos. Actualmente, se encuentran desarrollados los modelos de señalización de curvas horizontales para el control de riesgo de deslizamiento de Echaveguren y Vargas-Tejeda (2015) y para el control de rollover de Cruz y Echaveguren (2019). También se encuentran desarrollados los modelos de aplicación de sellos de alta fricción para control de deslizamiento de Díaz (2017). Otras medidas de abatimiento de riesgo se obtienen directamente desde los modelos desarrollados en procesos anteriores. Por ejemplo, la aplicación de medidas de reducción de peligrosidad de costados del camino se puede obtener directamente usando el modelo de Rivera y Echaveguren (2014).

2.4 Resultados

El resultado que se obtiene luego de aplicar PATGER es una calificación del nivel de riesgo asociado a la infraestructura vial separada por segmentos y por tipo de vehículo (liviano y pesado). Adicionalmente, se puede estimar los cambios en el nivel de riesgo al aplicar medidas de abatimiento. Algunas de ellas se encuentran desarrolladas como se explicó en la sección anterior y otras se pueden aplicar directamente desde modelos específicos como por ejemplo los de peligrosidad de los costados del camino y de rollover.

3 MODELOS DE PATGER

En esta sección se describen los modelos que permiten elaborar el resultado principal de PATGER. Se incluyen los modelos que se encuentran actualmente desarrollados.

3.1 Modelos de Velocidad de Operación

Los modelos de velocidad de operación son específicos por tipo de vehículo y por geometría. En el caso de los vehículos considera vehículos livianos, buses y vehículos pesados. En el caso de la geometría considera curvas horizontales aisladas y sucesivas, curvas verticales cóncavas y convexas y curvas verticales sucesivas, pendiente longitudinales uniformes ascendentes y descendentes y rectas de pendiente baja.

La Tabla 1 muestra los modelos desarrollados para cada combinación geometría-tipo de vehículo. Las celdas sombreadas muestran modelos que incluyen el efecto de los estilos de conducción. Posteriormente, se muestran algunos de los modelos desarrollados. Los coeficientes de calibración se encuentran en las referencias respectivas.

Tabla 1: Modelos de velocidad de operación disponibles desarrollados para PATGER

| Tipo de vehículo | Curvas Horizontales | | Curvas Verticales | | | Rectas | | |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|---------------|
| | Aisladas | Sucesivas | Cóncavas | Convexas | Sucesivas | Ascendente | Descendente | Planas |
| Liviano | Echaveguren y Diaz (2017) Ec. 1 | Echaveguren et al. (2015) Ec. 2 | Cancino (2022) Ec. 3 | Cartes et al. (2022) Ec. 4 | Sanhueza (2021) | Sanhueza (2021) | Sanhueza (2021) | Flores (2022) |
| Pesado | Sáez (2001) | Valeria (2019) | E/D | E/D | E/D | Arellano et al. (2015) Ec. 5 | Echaveguren et al. (2012) | E/D |
| Buses | Sáez (2001) | E/D | E/D | E/D | E/D | E/D | E/D | E/D |

(E/D: en desarrollo)

$$V_{85} = \theta_0 + \theta_1 V_{85T} + \theta_2 \frac{1}{R} \quad (1)$$

$$\text{Curva de entrada: } V_{85,1} = \theta_0 + \theta_1 V_{85T} + \theta_2 \frac{V_{85T}}{R_1} \quad (2)$$

$$\text{Entretangencia: } V_{85ET} = V_{85,1} + \theta_0 T + \theta_0 \frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{Curva de Salida: } V_{85,2} = \theta_0 + \theta_1 V_{85ET} + \theta_2 \left[\frac{V_{85ET}}{R_2} \right]^2$$

$$V_{85CX} = \varepsilon_0(DS) + \varepsilon_1(DS)V_{85T} + \varepsilon_2(DS)G + \frac{\varepsilon_3(DS)}{K} \quad (3)$$

$$V_{85CV} = \varepsilon_0(DS) + \frac{\varepsilon_3(DS)}{K} \quad (4)$$

$$\text{Aceleración: } a = \gamma_1 + \gamma_2 V(x) - gG \frac{m}{M(V(x))} \quad (5)$$

$$\text{Velocidad de trepada: } V_t = 367.35 \frac{\lambda}{WP(f+G)}$$

En las Ecs. 1 a 5 θ_i , ε_i γ_i son coeficientes de calibración que se encuentran en las respectivas referencias; R y R_i son radios de curvatura, en m, T es la entre tangencia de curvas y contracurvas, en m, G es la pendiente longitudinal, en decimal; K es el parámetro de curvatura de curvas verticales, en m/m; DS es el estilo de conducción; W es el peso del vehículo en kN; P es la potencia del vehículo, en kW; f es el coeficiente de fricción, en decimal; m es la masa del vehículo, en kg; x es la distancia acumulada, en m; M es el peso efectivo, en kN; λ es la eficiencia del motor. El resto de los parámetros corresponde a velocidades expresadas en km/h, según: V_{85} es la velocidad de operación en la mitad de una curva aislada; V_{85T} es la velocidad de operación en tangente de entrada a la curva; $V_{85,1}$ y $V_{85,2}$ son las velocidades de operación en la curva 1 y 2, respectivamente; V_{85ET} es la velocidad en la entretangencia de curvas 1 y 2; V_{85CX} y V_{85CV} son las velocidades de operación en curvas verticales convexas y cóncavas; V_t es la velocidad de trepada. Finalmente, a es la aceleración longitudinal, en m/s.

3.2 Modelo de Peligrosidad de Costados del Camino

Este modelo fue desarrollado por Rivera y Echaveguren (2014). Se implementa en el módulo P_REC de la Figura 1. Permite estimar el nivel de peligro de los costados de un camino ante siniestros con salida de pista, considerando caminos bidireccionales y multipista. Las Ecs. 7 y 8 muestran los modelos de cálculo de índice de peligrosidad (IP). A mayor valor de IP mayor es la peligrosidad de los costados del camino.

$$IP = \alpha_0 + \alpha_1 TMDA - \alpha_2 DESPEJE + \alpha_3 TALUD - \alpha_4 BARRERA \quad (7)$$

$$IP = \beta_0 + \beta_1 TMDA - \beta_2 DESPEJE + \beta_3 TALUD - \beta_4 BARRERA \quad (8)$$

En las Ecs. 8 y 9, α_i y β_i son coeficientes de calibración disponibles en Rivera y Echaveguren (2014); $TMDA$ es el tránsito medio diario anual en vehículos/día-año; $DESPEJE$ es la distancia en m desde el borde de la berma al obstáculo más cercano; $TALUD$ es la inclinación del talud de corte o terraplén, en % respecto de la horizontal; $BARRERA$ es la presencia ($BARRERA = 1$) o ausencia ($BARRERA = 0$) de barreras de contención lateral.

3.3 Modelos de Estimación de Riesgo

3.3.1 Índice de Seguridad IS

Este modelo fue desarrollado originalmente por Cafiso et al. (2007). Se implementa en el módulo P_IRV , submódulo P_IASP de la Figura 1. Araya (2017) realizó una sensibilización y lo aplicó a un caso real en Bio Bio. El modelo permite estimar un índice de riesgo a partir de tres variables: exposición, severidad y frecuencia de accidentes, como lo muestra la Figura 2. Los submodelos de consistencia del diseño fueron desarrollados por Cárdenas-Aguilar y Echaveguren (2015) y Soto (2016) integrando los modelos de consistencia de Lamm et al. (1999) y Polus y Mattar-Habib (2004). Posteriormente, Domínguez (2019) calculó umbrales de consistencia usando datos de

accidentes, tráfico y los modelos de velocidad de operación para vehículos livianos descritos por las Ecs. 1 y 2.

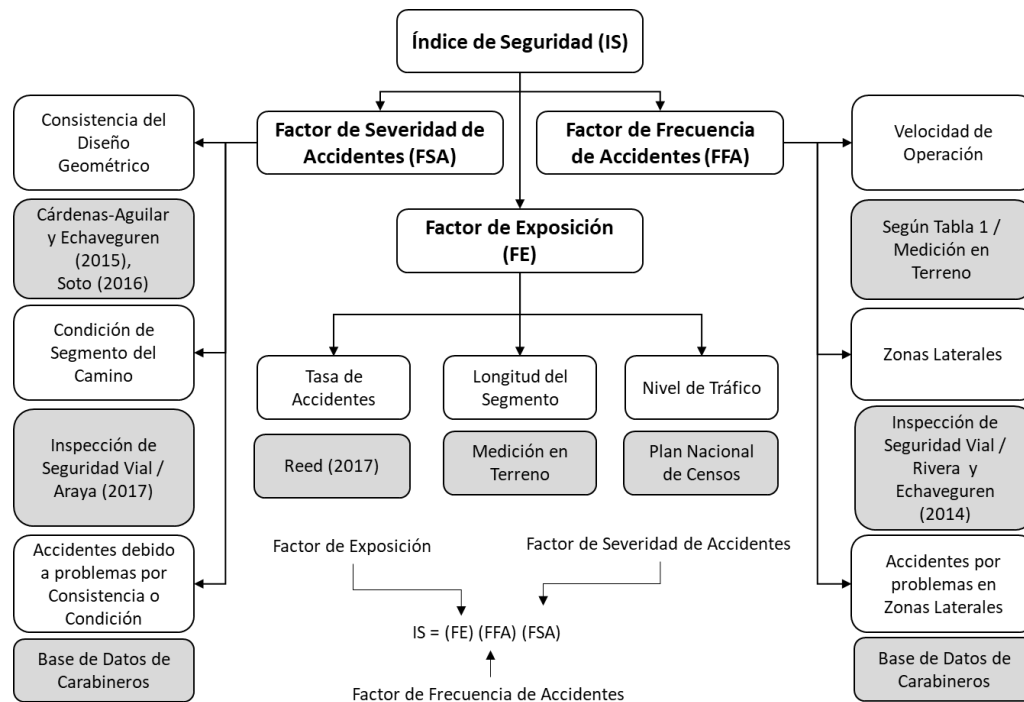


Figura 2: Esquema simplificado de modelo IASP adaptado a condiciones locales

Los modelos de condición de segmento de camino y de zonas laterales se basa en inspecciones de seguridad vial en terreno. El modelo de factor de exposición es similar al elaborado por AASHTO (2010). Reed (2017) lo calibró con datos de las regiones de Ñuble, Bio Bio y La Araucanía. El modelo depende esencialmente del TMDA, de la tasa de accidentes y de la longitud de los segmentos de análisis.

3.3.2 Índice de riesgo RSI

El índice de riesgo RSI basado en el modelo RANKERS para PATGER fue adaptado a la normativa chilena por Cheuquepal (2022). Se implementa en el módulo P_IRV, submódulo P_RANKERS de la Figura 1.

El índice se calcula asignando puntuaciones de 1 a 4 a cada uno de los atributos de seguridad de la Tabla 2. Por ejemplo, si el ancho de pista es menor a 2.8 m, la puntuación es 1, si está entre 2.8 y 3.0 m la puntuación es 2 y si está entre 3.3 y 3.5 m la puntuación es 4. De este modo, las características más desfavorables de cada componente se puntúan con notas más bajas y las más favorables con notas más altas. La columna de la derecha muestra el instrumento de homologación al caso chileno utilizado. En cada componente la calificación se calcula como el promedio de calificación de los atributos. Para la calificación general del tramo se calcula el promedio simple de las notas de cada componente.

Tabla 2: Atributos de los componentes de seguridad vial a calificar (Cheuquepal, 2022).

| Componentes de infraestructura | Descripción | Atributos | Homologación |
|--------------------------------|--|------------------------------------|--|
| Alineamiento del Camino | Proyección de la línea central del camino sobre el plano horizontal y vertical. | Radios de curvatura | Manual de Carreteras de Chile. Capítulos 3.100, 3.,200, 4.300, 6.300 |
| | | Ancho de pista | |
| | | Visibilidad | |
| | | Ancho de berma | |
| | | Señalización de tránsito | |
| Cruces y Accesos | Uniones a nivel, de calles o caminos con el tramo en evaluación, aunque no se atraviesen. | Cantidad de cruces y accesos | Manual de Carreteras de Chile, Capítulos 3.200, 3.400. 6.300 |
| | | Conexión entre acceso y camino | |
| | | Ubicación de accesos | |
| | | Señalización de tránsito | |
| Zonas de Adelantamiento | Zonas del camino en donde se permite el tránsito vehicular sobre la pista opuesta. | Visibilidad | Manual de Carreteras de Chile, Capítulos 3.200 y 6.300 |
| | | Demarcaciones | |
| | | Zonas de prohibición | |
| | | Adelantamiento en cruces | |
| | | Señalización de tránsito | |
| Costados del Camino | Espacio físico comprendido entre la berma y el límite de la faja vial. | Nivel de Riesgo | Se aplicó el modelo original. |
| Pavimento | Estructura dispuesta para la circulación de vehículos de forma segura, cómoda y eficiente. | Serviciabilidad de la calzada | Programa de Acciones de Mantenimiento PAM del MOP |
| | | Serviciabilidad de la berma | |
| | | Desniveles | |
| Consistencia del Trazado | Condición bajo la cual una vía se encuentra en armonía con las expectativas del conductor. | Características inesperadas | Manual de Carreteras de Chile. Capítulos 3.100, 3.,200, 6.300 y modelo de análisis de consistencia de Cárdenas-Aguilar y Echaveguren (2015) y Soto (2016). |
| | | Relación entre radios consecutivos | |
| | | Curvas inconsistentes | |

3.3.3 Índice de Riesgo IRG

Este índice se estima en base a escenarios de riesgo para vehículos livianos y pesados en base a los modelos disponibles en el laboratorio GESITRAN, que permiten estimar un índice de riesgo multidimensional, similar a la filosofía del índice RSI. Se implementa en el módulo P_IRV, submódulo P_GESITRAN de la Figura 1. La Tabla 3 define los escenarios de riesgo considerados. Cada uno de los escenarios de riesgo posee un diagrama de flujo que permite estimar el riesgo asociado a cada escenario y tipo de vehículo. De la Tabla 3 se seleccionaron diversos modelos que permiten estimar la posibilidad de ocurrencia de un siniestro. Algunos modelos son de carácter binario -como por ejemplo el modelo asociado al escenario E1P- y en otros probabilístico, como por ejemplo el modelo asociado al escenario E2P.

Tabla 3: Escenarios de riesgo del índice IRG

| Vehículo pesado | Vehículo liviano |
|---|---|
| E1P: Riesgo de pérdida de control en pendientes descendentes | E1L: Riesgo de colisión por visibilidad horizontal reducida |
| E2P: Riesgo de pérdida de control por rollover | E2L: Riesgo de pérdida de control por diferencias de velocidad |
| E3P: Riesgo de pérdida de control por inconsistencia del diseño | E3L: Riesgo de pérdida de control por inconsistencia del diseño |
| E4P: Riesgo de colisión por visibilidad horizontal reducida | E4L: Riesgo de pérdida de control por deslizamiento |
| E5P: Riesgo de vuelco o colisión en zonas laterales | E5L: Riesgo de vuelco o colisión en zonas laterales |

a) Modelo para escenario E1P

La pérdida de control en pendientes descendentes es un factor de riesgo operacional. El detonante puede ser el desvanecimiento del sistema de frenos o un cambio de marcha equivocado. El factor de riesgo se calcula comparando la distancia acumulada en pendiente descendente (d_a , en m) y la longitud crítica (CGL, en m), en función de la velocidad máxima de descenso seguro (VMDS, en km/h) y de la pendiente longitudinal del segmento (G , en %), usando la Ec. 9 (Echaveguren y Vargas-Tejeda, 2013). Si $CGL > d_a$, el riesgo es 0. En caso contrario, el riesgo es 1.

$$CGL = \frac{1}{G^2} \sqrt{-\frac{47489.2}{\ln\left(1.04 - \frac{VMDS}{120}\right)}} \quad (9)$$

b) Modelo para escenario EP2

El rollover consiste en la desestabilización del centro de gravedad del vehículo, produciendo una fuerza volcane que separa del pavimento las ruedas del vehículo. Afecta principalmente a vehículos pesados. La probabilidad de rollover se estima con los modelos desarrollados por Cruz y Echaveguren (2019), mediante el FORM (First Order Reliability Method). La Ecuación 10 muestra el modelo para camión articulado, en la que V es la velocidad de entrada a una curva, en km/h y R es el radio de curvatura, en m.

$$P_r = e^{\{-e^{[28.77 - 1.52V + 0.031V^2 - \frac{62.79V - 612.79}{R}]}\}} \quad (10)$$

c) Modelo para escenario E2L

Este modelo determina el riesgo de accidentes por inconsistencia de las curvas horizontales, elaborado por Cárdenas-Aguilar (2015) y los umbrales de consistencia de Domínguez (2019). De esta manera se calcula la consistencia en tres niveles: “deficiente”, “regular” y “bueno”, los cuales determinan riesgo de accidentes alto, medio y bajo, respectivamente. Estos niveles fueron propuestos originalmente por Lamm et al. (1999). El índice de consistencia se calcula con la Ec. 11, en la cual V_{85} es la velocidad de operación estimada con los modelos descritos en la Tabla 1 para vehículos livianos, en km/h; R es el radio de curvatura en m y p es el peralte de la curva, en decimal.

$$IC = 63.5R \left(-\frac{1}{602.4} + \sqrt{\frac{1}{602.4^2} + \frac{4(p + 0.265)}{127R}} \right) - V_{85} \quad (11)$$

A partir de este modelo se puede también estimar el riesgo de deslizamiento sustituyendo la expresión de a izquierda de la Ec. 1 por la ecuación de velocidad límite de deslizamiento que resulta de equilibrar la fricción del pavimento con la demanda de fricción. Si la velocidad límite es superior a V_{85} el riesgo de accidentes es 1 y si es inferior, es 0.

3.4 Modelos de Tratamiento de Riesgo

Los modelos de tratamiento de riesgo permiten estimar el efecto en el nivel de riesgo de realizar modificaciones desde el diseño vial hasta operativos, en base a los parámetros susceptibles de modificar en los modelos previamente descritos, o bien en base a modelos específicos.

Corresponden al módulo P_RR de la Figura 1. A continuación se muestran dos tipos de modelos de tratamiento de riesgo, cuyo propósito es reducir el nivel de riesgo mas no eliminarlo.

3.4.1 Modelo de Señalización de Velocidad Límite

Este modelo permite determinar una velocidad límite a señalizar en base a la velocidad de circulación en una curva de radio R, para una aceleración lateral limitada por comodidad medida con el equipo Ball Bank (b_T), según muestra la Figura 3. Corresponde al submódulo P_SLV. De la Figura 1. De acuerdo con la FHWA (2009), el ángulo recomendado es de 12° . Este cálculo se realiza curva a curva y permite definir señales de límite de velocidad para informar a los conductores la velocidad a la cual pueden circular.

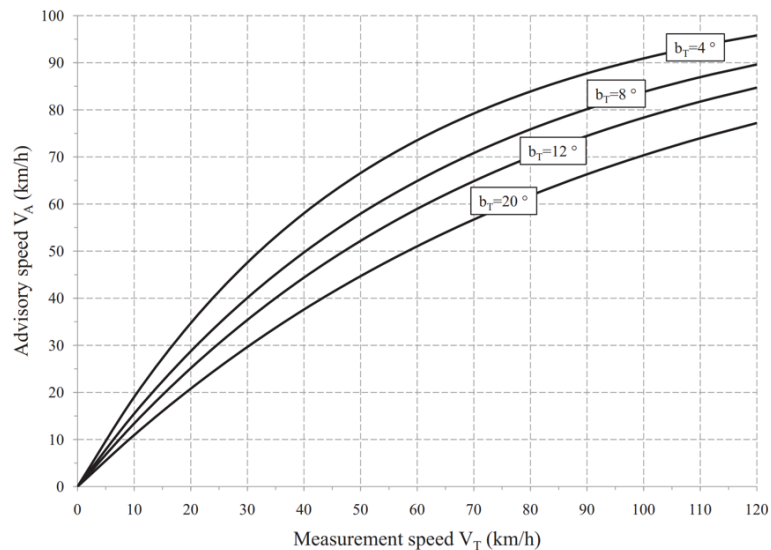


Figura 3: Velocidad recomendada para velocidad de medición y ángulo ball bank limite (Echaveguren y Vargas-Tejeda, 2013).

3.4.2 Modelo de Sellos de Alta Fricción

Los sellos de alta fricción (SAF) permiten mejorar la fricción en curvas horizontales. Son un compuesto sintético compuesto por bauxita calcinada y una resina como ligante. Los valores de fricción después de la aplicación del SAF pueden superar el valor de 0.9, lo cual implica que la velocidad límite para prevenir el deslizamiento aumenta sustantivamente, ampliando el margen de seguridad de las curvas horizontales. Díaz (2017) elaboró un ábaco que permite determinar cuándo se necesita un SAF en una curva horizontal, lo que permite optimizar la inversión en seguridad vial en base a evidencia técnica (Ver la Figura 4). Corresponde al submódulo P_SAF de la Figura 1. El ábaco utiliza como variables de entrada el radio de la curva y la velocidad de operación en la tangente de entrada. El área entre las curvas corresponde a la región factible para rangos consecutivos de velocidad, radios y coeficientes de fricción del pavimento.

Para emplear el ábaco se ingresa con el valor de velocidad en la tangente de entrada y el radio de la curva. Una vez localizado el punto, se proyecta una línea paralela a las líneas inclinadas desde ese punto hasta cortar el valor de resistencia al deslizamiento. Este valor es la resistencia al deslizamiento mínima para requerir un SAF. Si la fricción medida es superior a la mínima requerida, no se necesita un SAF. En caso contrario si se necesita. El modelo está parametrizado,

por lo cual es sencillo codificarlo para analizar en cada curva de un trazado la necesidad de un SAF.

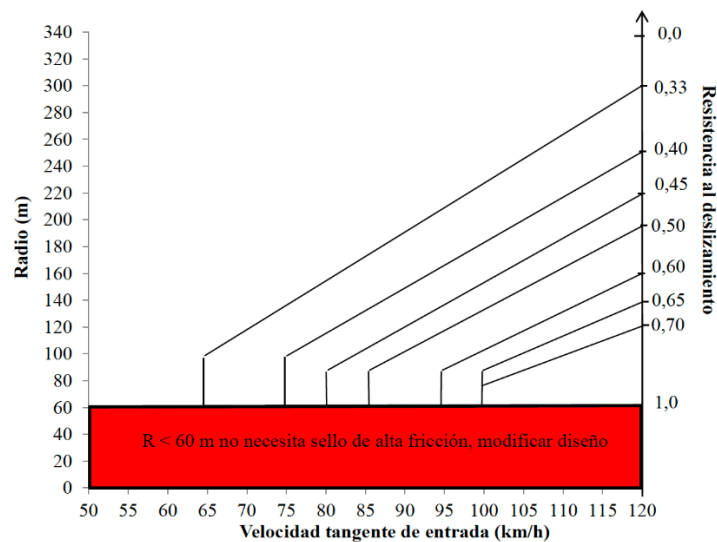


Figura 4: Ábaco para determinar la necesidad de aplicar un sello de alta fricción (Díaz, 2017).

4 CONCLUSIONES

Este artículo describe resumidamente el modelo PATGER destinado a estimar el riesgo vial en la región del Bio Bio. El modelo articula la investigación desarrollada por más de 20 años en materia de diseño vial, seguridad vial y análisis operacional. Si bien el modelo no se encuentra totalmente desarrollado, el marco general y el concepto de análisis planteado en el artículo permiten describir adecuadamente la orientación de este sistema, con miras a su implementación en una plataforma computacional abierta. A continuación, se plantean las principales conclusiones y los principales desafíos trazados en el desarrollo de PATGER.

PATGER está orientado esencialmente a la visualización del riesgo asociado a la relación entre la infraestructura vial, la operación y la seguridad vial. De este modo, el producto es útil para la toma de decisiones de los operadores de transporte de carga en cuanto al entrenamiento de conductores en rutas que presentan diferentes niveles de riesgo y/o a la focalización de inversión en el caso de agencias. Por lo anterior, PATGER también busca contribuir a nivel país a lograr los objetivos de la Política Nacional de Seguridad de Tránsito en el ámbito del objetivo vías de tránsito y movilidad más seguras de dicha política y, por extensión, al objetivo usuarios de las vías de tránsito más seguros.

Las fuentes de información que utiliza PATGER son de dos tipos. Uno corresponde a información de carácter público y que es generada y utilizada por la Dirección de Vialidad frecuentemente, como son la red oficial única y los datos de tráfico. El segundo grupo de datos proviene de las inspecciones de seguridad vial en terreno, información que está siendo levantada por los desarrolladores de PATGER para este proyecto. Por ello, se está trabajando en el desarrollo de tecnologías que faciliten el levantamiento de la información en terreno sobre la base de experiencias de los sistemas iRAP, IASP y RANKERS, pero bajo la premisa de balancear el costo, la calidad de la información y el tipo de información específica para PATGER.

Los modelos requeridos por PATGER se han desarrollado para casos específicos que no cubren la totalidad de requerimientos. En este sentido, los modelos faltantes principalmente corresponden a vehículos de carga y transporte de pasajeros que por sus características ofrecen tamaños muestrales sustantivamente inferiores al transporte privado. Por ello, un desafío relevante para la mejora continua de esta plataforma es acceder a información que actualmente es relevada desde sistemas de control de flota mediante GPS que no han sido contrastadas con la geometría para determinar las relaciones causales entre velocidad y geometría.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen al Fondo de Innovación para la Competitividad Regional (FIC-R) del Gobierno Regional Región del Biobío por el financiamiento otorgado al proyecto “**Gestión del Riesgo Vial en el Transporte (PATGER)**”, Código BIP N°40036119-0, a partir del cual se ha elaborado este trabajo.

6 REFERENCIAS

AASHTO (2010). **Highway Safety Manual**. American Association of State Highway and Transportation Officials. 1a Edición. Washington DC. Estados Unidos.

Aburto, D. (2015). **Método para obtener el alineamiento horizontal de vías rurales usando datos de azimut y distancia**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.

Araya, D. (2017). **Aplicación de índice de seguridad vial en caminos bidireccionales en la región del Biobío**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.

Arellano, D., Echaveguren, T. y Vargas-Tejeda, S. (2015). A model of truck speed profiles on short upward slopes. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport**, 168(5), 475 – 483.

Cafiso, S., G. La Cava y Montella, A. (2007). **Identificazione e Adeguamento delle Strade Pericolose**, Final Research Report. Proyecto TREN-03-ST-S07. 31286.

Cancino, O. (2022). **Modelación de velocidad de operación en curvas verticales cóncavas**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.

Cárdenas-Aguilar, D. y Echaveguren, T. (2015). Comparison of consistency assessment models for isolated horizontal curves in two-lane rural highways. **Dyna**, 82(194), 57 – 75.

Cartes, P., Echaveguren, T. y Álvarez, P. (2022). Effect of driving style on operating speed in crest vertical curves of two-lane highways. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport**, 175(5), 290 – 299.

Cheuquepal, Y. (2022). **Procedimiento de aplicación del índice de seguridad RSI a tramos de caminos pavimentados bidireccionales**. Memoria de Título. Ingeniero Civil. Universidad de Concepción, Chile.

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

Daidone, L., Pagliari, E., Pennisi, L., Caporali, E., Mazzia, E. y Tiberi, P: (2023). Road Infrastructure Inspections to Assess the Road Network According to the iRAP/EuroRAP methodology. **Transportation Research Procedia**, 69, 743 – 750.

de Solminihaç, H., Echaveguren, T., y Vargas, S. (2007). Friction reliability criteria applied to horizontal curve design of low-volume roads. **Transportation Research Record**, 1989(1), 138 – 147.

Díaz, C. (2017). **Procedimiento para determinar la necesidad de sellos de alta fricción en curvas horizontales**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.

Domínguez, J. (2019). **Actualización de umbrales de consistencia para caminos bidireccionales de la macrozona centro-sur de Chile**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.

Echaveguren, T. y Carrasco, D. (2015). Estimación de longitud crítica en pendientes ascendentes en caminos bidireccionales. **Revista Ingeniería de Construcción**, 30(1), 5 – 16.

Echaveguren, T. y A. Díaz (2013). Perfiles de Velocidad de Operación en Curvas Horizontales Aisladas. **XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Santiago. Chile.

Echaveguren, T., Díaz, Á. y Vargas-Tejeda, S. (2015). Operating speed models for horizontal reverse curves. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport**, 168(6), 510–522.

Echaveguren T., Serri M. y, Vargas-Tejeda S. (2012). Método de evaluación de necesidad de implementación de lechos de frenado en pendientes descendentes prolongadas. **XVII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tráfico y Transporte**. Santiago, Chile.

Echaveguren, T., y Vargas-Tejeda, S. (2013). Evaluación de la necesidad de lechos de frenado en pendientes descendentes usando principios de confiabilidad. **Revista Ingeniería de Construcción**, 28(3), 113 - 127.

Echaveguren, T. y Vargas-Tejeda, S. (2015). A model for estimating advisory speed for horizontal curves in two-lane rural roads. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 40, 1234 – 1243.

FHWA (2009). **Manual on Uniform traffic Control Devices (MUTCD)**. Federal Highway Administration. Estados Unidos.

Flores, N. (2020). **Velocidad de operación en rectas de caminos bidireccionales: Efecto del estilo de conducción, peligrosidad de las zonas laterales y pendiente longitudinal**. Memoria de Título. Ingeniero Civil. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

- González, D., Echaveguren, T., Tudela, A. y Vaccari, P. (2018). Exploración de un instrumento cuantitativo para evaluar estilos de conducción en carreteras en Chile. **VI Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial**. Lima. Perú.
- Lamm, R., Psarianos, B. y Mailaender, T. (1999). Highway design and traffic safety engineering handbook. 1st Edition. McGraw Hill, Nueva York.
- Ortiz-Morales, G. Echaveguren, T., Rivas-Medina, A. y Cartes, P. (2023). Uncertainty in the back-calculation of geometric parameters of vertical curves obtained with UAV. **Journal of Surveying Engineering**. 149(1), 04022015.
- Parra F. y Echaveguren T. (2016). Análisis de la zona no visible en curvas verticales inversas y sucesivas. **12avo Congreso Provincial**. Viña del Mar. Chile.
- Peña, M. (2017). **Desarrollo de un modelo de velocidad de aproximación para curvas horizontales**. Memoria de Título. Ingeniero Civil. Universidad de Concepción, Chile.
- Polus, A. y Mattar-Habib, C. (2004). New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety. **Journal of Transportation Engineering**. 130(3), 286 – 293.
- Ramos, G., Perandones, J., Alonso, M., Plaza, P. y Vega, H. (2008). **Ranking for European Road Safety, Final Report**. (Proyecto TREN-04-FP6TR-S07. 36996/001978). Valladolid, España.
- Reed, C. (2015). **Estimación de umbrales de consistencia para caminos bidireccionales de la región del Biobío**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.
- Rivera, J.I. y Echaveguren T. (2014). A hazard index for roadside of two-lane rural roads. **Dyna**, 81(184), 55 – 61.
- Sáez, C. (2001). **Estudio de Consistencia en diseño de vías rurales**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.
- Sanhueza, Á. (2021). **Modelación de velocidad de operación en curvas verticales sucesivas**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.
- Soto, E. (2016). **Modelo de Análisis de Consistencia para curvas en “S” en caminos bidireccionales**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.
- Valeria, D. (2019). **Método para elaborar curvas empíricas de probabilidad de rollover de vehículos articulados**. Memoria de Título. Universidad de Concepción, Chile.