

## ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

# Método de análisis de los riesgos de accidente en los pasos a nivel para mejorar la seguridad operacional ferroviaria

*Level crossing accident risk analysis method to improve railroad operational safety*

**Pedro Paulo Ferreira Peron**

<https://orcid.org/0000-0003-0619-4507>

**Mariana Verbena Casella**

<https://orcid.org/0000-0002-5206-8723>

**Aldrei Camille Max Skwarok**

<https://orcid.org/0000-0002-6104-9647>

**Renata A. de Mello Bandeira**

<https://orcid.org/0000-0002-2776-2473>

**Vânia Barcelos Gouvêa**

**Campos**

<https://orcid.org/0000-0002-3206-168X>

**Orivalde Soares da Silva Junior**

<https://orcid.org/0000-0003-0743-8024>

Sección de Enseñanza de Ingeniería de Fortificación y Construcción. Ingeniería de Transporte, Instituto Militar de Ingeniería, Brasil.

Edición en portugués: «Método De análise Dos Riscos De Acidentes Em Passagens Em nível Objetivando O Aumento Da segurança Operacional ferroviária». Revista Transporte y Territorio, n.º 28 (junio 2023), 122-41.

<https://doi.org/10.34096/rtt.i28.10395>

Recibido: 05/06/24  
Aceptado: 08/06/24

## Resumen

Este artículo propone un método para analizar los riesgos de accidentes existentes en los pasos a nivel de las vías férreas brasileñas. Se realizó un análisis de las normas nacionales e internacionales para identificar los principales criterios utilizados para clasificar el tipo de riesgo y definir el tipo de señalización que se debe utilizar para aumentar la seguridad de estos cruces. Con base en los resultados del análisis, se desarrolló una metodología y se aplicó a la red ferroviaria de la región sudeste del país. Los datos obtenidos muestran que las inversiones en señalización tuvieron resultados positivos. Además, esta reducción de accidentes permitió el aumento de la velocidad máxima autorizada (VMA) en el tramo estudiado, lo que generó un menor impacto en el tráfico, ya que los pasos a nivel se despejan más rápidamente. Esto garantiza beneficios tanto para la operación ferroviaria como para la población que necesita cruzar en estos puntos, reduciendo el ruido emitido por el tráfico y la necesidad de mantenimiento de locomotoras y vagones.

## Abstract

This article proposes a method for analyzing the risks of accidents at level crossings on Brazilian railroad tracks. An analysis of national and international standards was conducted to identify the main criteria used to classify the type of risk and define the type of signaling that should be used to increase the safety of these crossings. Based on the results of the analysis, a methodology was developed and applied to the railway network in the southeastern region of the country. The data obtained shows that investments in signaling had positive results. In addition, this reduction in accidents allowed for an increase in the maximum authorized speed (MAS) in the section studied, which generated a lower impact on traffic, since the level crossings are cleared more quickly. This ensures benefits for both the railway operation and the population that needs to cross at these points, reducing the noise emitted by traffic and the need for maintenance of locomotives and wagons.

**Palabras clave:** Pasos a Nivel - Seguridad Operacional - Gestión de Riesgos - Accidentes Ferroviarios - Señalización Activa y Pasiva.

**Keywords:** Level Crossing, Safety, Railway Accidents, Risk Management, Active and Passive Signaling.

## Introducción

La realización de cualquier actividad, incluso con cautela, conlleva riesgos, y una de las mejores formas de manejarlos es evitarlos (Furtado, 2012). Evitar que los riesgos se conviertan en accidentes está relacionado con la inversión en prevención, la gestión de factores y causas, así como la toma de conciencia sobre las mejores prácticas y actitudes en cualquier actividad. Por lo tanto, una organización necesita estar preparada para situaciones que impliquen riesgos, capacitar a sus empleados y disponer de documentos que orienten sobre cómo deben proceder, utilizando conceptos y herramientas de gestión de riesgos (Silva, 2010).

En el sistema de transporte ferroviario, los riesgos existentes pueden estar relacionados con los siguientes factores: fallo humano o funcional (debido al comportamiento de las personas implicadas), material rodante (estado operativo de los vehículos, como locomotoras o vagones), vía principal (características de la vía, infraestructura, superestructura, señalización y entorno) y factores legales, sociales o institucionales (características de la comunidad circundante o aspectos relacionados con la regulación e inspección) (Ribeiro, 2011). Por lo tanto, la prevención y gestión de los factores de riesgo en el transporte ferroviario están vinculadas a la evaluación de todas las dimensiones mencionadas, así como al tipo de carga transportada (Areosa, 2012).

En comparación con otros modos de transporte, el ferrocarril presenta ventajas en lo que respecta a los riesgos debido a la presencia de vías de dominio propio, el control del tren y del producto transportado, un sistema de comunicación propio, la existencia de planes de respuesta en caso de accidente, de equipos de rescate especializados, de técnicos en seguridad y medio ambiente, etc. (Ferreira y Almeida, 2006).

Los accidentes ferroviarios representan uno de los principales riesgos asociados a este modo de transporte, ya que generan numerosos inconvenientes: costos de reparación de la vía y del material rodante dañado, pérdida de mercancías en caso de vuelco de vagones, costos de operación debido a la interrupción del tráfico; se trata de factores que, en áreas metropolitanas, afectan a la población local (Ribeiro, 2011).

Esta situación se agrava especialmente cuando los accidentes involucran mercancías peligrosas, que pueden ser agresivas para los seres vivos y el medioambiente en general. Además, estos incidentes afectan directamente la imagen de las empresas y su capacidad para obtener nuevos contratos, ya que repercuten en los clientes, la comunidad y el medioambiente. También son indicadores vigilados de cerca por la Agencia Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), lo que puede acarrear consecuencias como multas y la prohibición de renovación de concesiones.

Según Hauer (1997), podemos definir la seguridad de una entidad a partir del número y tipo de accidentes, así como su gravedad, que se espera ocurran durante un período específico. Más del 60 % de los accidentes ferroviarios en Brasil ocurren en cruces entre vías férreas y rutas o calles (pasos a nivel), siendo la principal causa la imprudencia de conductores y peatones (ANTT, 2015).

La Resolución N.º 5902 (ANTT, 2020) refuerza que algunos de los principales tipos de accidentes ferroviarios son: atropello en pasos a nivel, cuando hay colisión entre un vehículo ferroviario y un ser humano; y colisión en pasos a nivel, cuando hay colisión entre un vehículo ferroviario y otro no ferroviario.

El Código Nacional de Tránsito (CNT), por la Ley N.º 9503/1997, define un paso a nivel (PAN) como "todo cruce entre una carretera y una línea ferroviaria o tranviaria con vía propia", que puede ser a nivel, cuando el paso se produce al mismo nivel, o a desnivel, cuando el cruce se produce con un paso inferior (túneles, por ejemplo) o superior (como los viaductos) (JUSBRASIL, 2020).

Según datos de 2008 de la Agencia Nacional de Transportes Ferroviarios (ANTF), había 12.273 pasos a nivel catalogados a lo largo de 29.817 km de líneas ferroviarias en Brasil (Peron, 2016). Estas intersecciones entre carreteras y ferrocarriles comprometen la velocidad de circulación de los trenes y, consecuentemente, la capacidad de transporte de las concesionarias ferroviarias. Se consideran un "cuello de botella logístico" porque interfieren en la circulación de los trenes, los cuales mayoritariamente transportan commodities hacia los puertos (Castillo, 2007).

Además, los pasos a nivel ferroviarios presentan un alto riesgo de accidentes, exacerbado por el volumen de tráfico en ambos sistemas y su ubicación (Carmo, Lopes y Campos, 2012). Debido a que la mayoría de los ferrocarriles brasileños tienen más de cien años, las ciudades han crecido muy cerca de las vías, lo cual afecta la seguridad operacional.

Para prevenir accidentes, corresponde a las concesionarias ferroviarias, responsables de la creación de los PAN, implementar la señalización correspondiente. Son responsables de cualquier deficiencia, insuficiencia o instalación incorrecta de dicha señalización (JUSBRA-SIL, 2020). Sin embargo, es importante destacar que, además de estas medidas, el apoyo de los poderes públicos y de la sociedad en general es fundamental para reducir el número de accidentes.

En este contexto, el presente artículo aborda el análisis de los riesgos específicamente relacionados con los accidentes en pasos a nivel de una concesionaria ferroviaria. Se ha desarrollado un método para analizar estos riesgos, basado en el estudio detallado de la reglamentación nacional e internacional sobre el tema. El método propuesto ofrece ventajas respecto a las evaluaciones actuales en el país al incluir, además de la normativa vigente, el análisis de la visibilidad como un elemento crucial en el proceso de toma de decisiones. También define un enfoque para priorizar la atención en aquellos casos donde se analizan múltiples pasos a nivel. A su vez, el método propuesto no se limita a su implementación en nuevos PAN, sino que también puede aplicarse para mejorar la seguridad en los ya existentes.

Este enfoque se aplicó a la red de un operador ferroviario de Brasil y se analizaron los indicadores de accidentes en los lugares donde se adoptaron medidas preventivas, teniendo en cuenta la gravedad de los riesgos y las causas identificadas en el historia de accidentes. Así, se mapearon las acciones preventivas empleadas y se evaluó la eficacia de su implementación para el periodo que va de 2014 a 2019.

## **Pasos a nivel**

Las soluciones potenciales para prevenir accidentes en los pasos a nivel, responsabilidad de las concesionarias ferroviarias, están relacionadas con la implementación de la señalización adecuada en estos lugares, conforme a su clasificación. A continuación, se presentan las regulaciones y clasificaciones de los pasos a nivel ferroviarios en Brasil y en el extranjero.

### ***Reglamentación y clasificación de los pasos a nivel***

A nivel internacional, los criterios utilizados para identificar los PAN se clasifican en función de varios aspectos clave: condiciones físicas, condiciones de tráfico, condiciones operativas, comportamiento humano e historial de accidentes.

La Tabla 1 resume los criterios adoptados en Estados Unidos (EE. UU.), Australia y Canadá para clasificar sus PAN. La elección de estos tres países se debe a su similitud con Brasil en términos de tipo de carga, volumen transportado y tamaño del territorio, así como por la importancia del ferrocarril en sus matrices de transporte. El modelo europeo no se incluyó en el análisis debido a diferencias significativas, como el tamaño más reducido de los países y un enfoque más centrado en el transporte de pasajeros.

En Brasil, según el Código Nacional de Tránsito (CNT), los ferrocarriles no pueden impedir que las carreteras crucen sus líneas, y estos cruces deben preferiblemente realizarse a desnivel. Sin embargo, debido al gran número de PAN existentes en el país, resulta inviable que todos ellos se conviertan en pasos a desnivel debido a la alta inversión necesaria y a la limitada disponibilidad de recursos para llevar a cabo este tipo de obras.

El principal problema que afecta a los PAN en Brasil está directamente relacionado con su regulación (Peron, 2016). No existe una definición clara de las responsabilidades en cuanto al mantenimiento e instalación de sistemas de seguridad. Las normas de clasificación, que deberían ayudar a identificar las soluciones más adecuadas para cada tipo de cruce, son poco utilizadas por los involucrados en el proceso. Además, las normativas brasileñas que deberían guiar a los concesionarios ferroviarios, son difíciles de entender y tienen una aplicación práctica limitada (Peron, 2016).

Tabla 1. Normativa internacional y clasificación de los PAN

País	Clasificación de los PAN
Estados Unidos	<p>En EE. UU., los criterios de comportamiento humano y el historial de accidentes no se utilizan como base para los análisis de clasificación de los PAN, sino únicamente criterios físicos (distancia de visibilidad, número de vías, pendiente/curvatura de la carretera, calles adyacentes, reflejo del sol); de tráfico (volumen de vehículos automotores, trenes y peatones) y operativos (modo de utilización). Según Queensland Transport (1999), estos criterios se relacionaron mediante una ecuación matemática, con el fin de calcular el índice de "peligrosidad" (posibles accidentes), mediante el cual el Departamento de Transporte de EE. UU. considera posible predecir el número de sucesos que pueden producirse en un PAN determinado. A partir de las predicciones resultantes, Saccomanno y otros (2006) propusieron una clasificación en tres categorías de los PAN en EE. UU.: 1) PAN con señalización pasiva, 2) PAN con señalización activa y luces intermitentes; y 3) señalización activa con portones/barreras. Sin embargo, Raub (2006) considera que la ecuación propuesta por Queensland Transport (1999) no capta el patrón cambiante del tráfico automotor y ferroviario a lo largo del día, además de no tener en cuenta el ángulo del cruce con la carretera y la vegetación en las proximidades del paso. Asimismo, según Raub (2006), la existencia de solo tres categorías de sistemas de alerta no permite, por ejemplo, distinguir entre vallado parcial o completo con el uso de barreras/portones. Por lo tanto, aunque los criterios se relacionan mediante una ecuación matemática, resulta necesario reevaluar la clasificación utilizada en los EE. UU. con vistas a eliminar los puntos considerados defectuosos.</p>
Australia	<p>En Australia, se desarrollaron varios estudios sobre modelos de priorización de PAN, el principal es el Australian Level Crossing Assessment Model (ALCAM). Se trata de un algoritmo de clasificación que tiene en cuenta, para cada PAN, las propiedades físicas (características y controles) y los comportamientos humanos habituales relacionados con el tema (ALCAM, 2020). El ALCAM es una herramienta matemática que contempla las características físicas y los controles existentes tanto en los pasos a nivel ferroviarios como ferropedonales. El modelo considera que los elementos físicos y el comportamiento de los conductores y peatones ordinarios en el lugar deben correlacionarse para proporcionar una puntuación de "factor de probabilidad" para cada PAN, lo que permitiría comparar y priorizar el riesgo relativo en todos los PAN de una misma región. Además, el modelo asigna puntos de riesgo en función de las características del PAN estudiado y de la relación entre estas características y las diferentes causas de accidentes (ALCAM, 2020).</p>
Canadá	<p>En Canadá, se desarrolló un modelo de predicción de accidentes basado en datos de los 10.449 PAN del país, recogidos entre 1993 y 2001 (Saccomanno et al., 2006). Este modelo utiliza datos de colisiones, incluyendo inventario e historial de colisiones. Así, a partir de sus resultados, se identificaron los siguientes criterios para tener en cuenta en el análisis de los PAN: la existencia de dispositivos de alerta, los atributos geométricos, las características del tráfico y la ocurrencia de colisiones. Según Saccomanno et al. (2006), muchos modelos actuales de predicción de accidentes son incapaces de representar toda la gama de factores que explican la variación de la frecuencia de colisiones en cruces individuales durante un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, para aumentar la fiabilidad de los modelos de predicción, el criterio de visibilidad se valida con el del modelo propuesto. El modelo resultante puede utilizarse después para evaluar la seguridad y las propuestas de tratamiento de los problemas vinculados a los cruces.</p>

Fuente: elaboración propia

La Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) estableció normativas relacionadas con el proceso de regulación de los PAN, tales como:

- NBR 7613:2019, que establece los requisitos para la determinación del momento de circulación (MC), el grado de importancia (GI) y el índice de criticidad (IC) para los cruces de carreteras sobre vías férreas al mismo nivel (ABNT, 2019a).
- NBR 12180:2009, que especifica los requisitos para equipos de protección eléctrica, para cruces de rutas sobre vías férreas en PAN públicos (ABNT, 2009).
- NBR 15680:2017, que especifica los requisitos de proyecto para nuevos cruces de carreteras sobre PAN públicos (ABNT, 2017).
- NBR 15942:2019, que establece la clasificación y los requisitos de los equipos de protección para cruces de carreteras por vías férreas (ABNT, 2019b).

Sin embargo, estas normas de la ABNT se basan en conceptos que, en la opinión de las concesionarias, no son muy aplicables en la práctica. Por ejemplo, la norma NBR 15680:2017, que se considera la norma orientadora sobre el tema, contiene ítems que no son aplicables a los PAN existentes. La norma NBR 7613:2019 sufrió una gran alteración cuando Carmo et al. (2007) propusieron incluir el índice de criticidad en su texto. No obstante, el desajuste entre esta norma y la realidad es que no se relaciona con las distintas categorías de PAN, que podrían tratarse de forma diferente, teniendo en cuenta no solo criterios de seguridad, sino también sociales y económicos.

El Manual de Cruces de Carretera-Ferrocarril (1979) del Departamento Nacional de Tránsito (DENATRAN, 1987) sigue siendo la base para cualquier estudio sobre PAN. Sin embargo, en estos 45 años cambiaron muchos criterios, sobre todo el número de vehículos, el volumen de transporte y la densidad poblacional.

Por lo tanto, resulta fundamental analizar qué criterios deben adoptarse actualmente para la clasificación y evaluar el impacto real de cada uno de ellos en el modelo propuesto de clasificación de pasos a nivel (PAN). Los aspectos de seguridad deben ser ponderados basándose en datos históricos, mientras que los volúmenes de tráfico deben evaluarse en diferentes períodos. Además, los costos y las inversiones deben ser considerados en el análisis.

Creemos que es esencial proponer un nuevo modelo brasileño para el análisis y tratamiento de los PAN, que debe ser normatizado en un único documento.

### ***Consolidación de los criterios adoptados***

A partir de las normas brasileñas existentes y de los modelos implementados en Estados Unidos, Canadá y Australia, se construyó la Tabla 2, que resume los principales criterios adoptados en dichos países para clasificar los pasos a nivel y definir posteriormente las medidas necesarias para garantizar la seguridad en estos lugares. Este tipo de análisis es crucial para mapear los criterios utilizados en diversas regiones del mundo, permitiendo evaluar cuáles de estos ítems son pertinentes para la realidad brasileña.

La Tabla 2 muestra que la mayoría de los criterios identificados se adoptan en al menos dos de los países estudiados. Sin embargo, es importante destacar que el modelo australiano es más complejo de analizar debido a su enfoque en el historial de accidentes, sus causas y consecuencias. Una debilidad notable de este modelo radica en el uso del criterio "comportamiento humano", que es altamente subjetivo y difícil de cuantificar. La subjetividad surge de las percepciones personales y la variabilidad en las opiniones humanas, que pueden cambiar según la urgencia o criticidad de cada situación, sin un estándar definido para su análisis y determinación, lo que complica aún más su evaluación.

Con respecto al modelo estadounidense, su mayor ventaja radica en que mapea todas las situaciones de tráfico, incluyendo a los peatones, al igual que el modelo actualmente adoptado en Brasil. Sin embargo, su principal debilidad es la exclusión de criterios relacionados con los accidentes, lo que limita su capacidad para reflejar una base sólida en la clasificación de cruces.

Entre los modelos estudiados, el canadiense muestra un menor número de criterios físicos mapeados. Esto podría representar un riesgo elevado, dado que las condiciones locales tienen un impacto directo en los análisis requeridos.

En la Tabla 2 se observó que todos los criterios relacionados con las condiciones de tráfico ya han sido adoptados por las normativas brasileñas para definir las medidas de seguridad necesarias en los PAN.

En cuanto a los criterios físicos, Brasil ya considera aspectos como la distancia de visibilidad, la pendiente de la carretera y el número de carriles. El criterio "ángulo de la carretera", adoptado únicamente por Canadá, actualmente se considera un obstáculo en el cálculo de la visibilidad, que tiene en cuenta la ubicación y el acceso al PAN.

Asimismo, se argumenta que el criterio "reflejo del sol" no debería considerarse de manera aislada en el análisis, ya que la iluminación se incluye en los factores base del modelo de cálculo. Además, el criterio de "calles adyacentes", que ya está normalizado y controlado por los responsables del tráfico automotor, no debería añadirse como un nuevo punto, dado que su impacto en el modelo de análisis de riesgos en los PAN ya se refleja en el volumen de tráfico.

Tabla 2. Resumen de los criterios utilizados en cada país

Parámetros adoptados	Países				
Clasificación	Descripción	Australia	Brasil	Canadá	EE. UU.
Físicas	Ángulo de la carretera			x	
	Reflejo del sol				x
	Calles adyacentes				x
	Distancias de visibilidad (curvatura)	x	x	x	x
	Pendiente de la carretera (rampa)		x		x
	Número de vías		x		x
Tráfico	Velocidad de los trenes	x	x	x	
	Velocidad de los vehículos	x	x	x	
	Volumen de peatones		x	x	x
	Volumen de trenes	x	x	x	x
	Volumen de vehículos	x	x	x	x
Operacionalización	Existencia de dispositivos de alerta			x	
	Modo de utilización				x
Accidentes	Causas	x		x	
	Consecuencias	x			
	Ocurrencias	x		x	
Comportamiento humano		x			

Fuente: elaboración propia

## Método de análisis de los riesgos de accidente en los pasos a nivel

El método propuesto se divide en dos módulos, aunque no es obligatorio ejecutarlos de forma conjunta. El primer módulo, "Análisis técnico de pasos a nivel", consiste en el relevamiento de las características físicas y operativas, así como en el análisis de los PAN en relación con las normas brasileñas vigentes. Se presta especial atención a la definición de las etapas para la categorización de los PAN.

El segundo módulo, "Priorización de la demanda de adecuación de pasos a nivel", establece un método para actuar en los PAN según su grado de riesgo. Aquí se contrasta el tipo de protección existente con el exigido por la norma. La diferencia resultante genera una lista de prioridades para las intervenciones y adecuaciones necesarias. En caso de igualdad de valores entre los PAN del grupo analizado, se utiliza el historial de accidentes para priorizarlos. A continuación, se detallan ambos módulos.

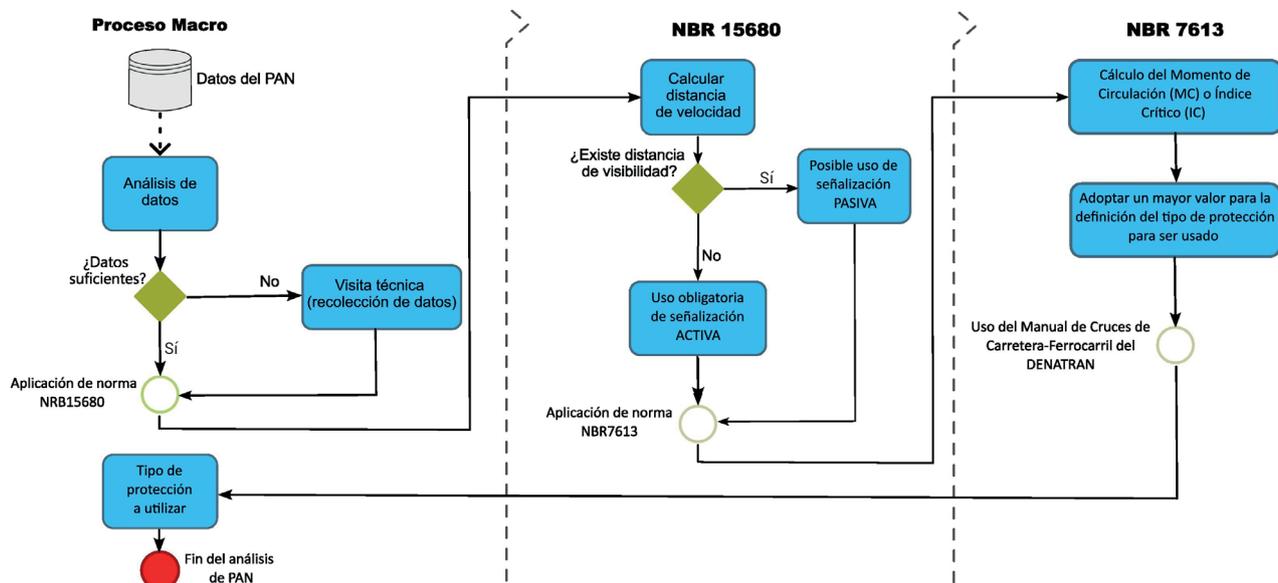
El módulo I, además de relacionar las normas vigentes en Brasil, incluye la etapa de análisis de la visibilidad como parte fundamental y decisoria del proceso, de modo que no se limita al diseño de nuevos PAN. El módulo II presenta una forma de priorizar la demanda en los casos en que se analice más de un PAN, ayudando a definir dónde se deberían realizar las primeras inversiones y adecuaciones.

Para facilitar la aplicación práctica del método, se desarrolló una herramienta informática con base en un software Excel, que puede ser utilizada en cada una de las etapas propuestas para el análisis de los PAN.

### Módulo I – Análisis técnico de pasos a nivel

El análisis técnico de PAN tiene por objetivo clasificarlos en grupos en función de sus parámetros operativos y físicos y de la aplicación de las normas brasileñas existentes, con el fin de definir el tipo de protección a utilizar en cada caso. La Figura 1 sintetiza las etapas a desarrollar en este tipo de análisis, que correlaciona las normas vigentes e incluye la fase de análisis de la visibilidad como factor decisivo.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Fuente: elaboración propia

La Figura 1 muestra que la primera etapa de este módulo consiste en la identificación del PAN a analizar, que debe ir seguida de la cartografía de sus características físicas (Tabla 3). También se deben analizar las características operacionales del modo ferroviario y automotor en dicho PAN (Tabla 3), que están directamente relacionadas con los ítems "seguridad y protección" necesarios para un cruce ferroviario.

La Figura 1 ilustra que la primera etapa de este módulo implica la identificación del PAN a analizar, seguida por el mapeo de sus características físicas, como se detalla en la Tabla 3. Además, se analizan las características operacionales del modo ferroviario y del automotor en el PAN bajo estudio, las cuales están directamente vinculadas a los requisitos de seguridad y protección necesarios para los cruces ferroviarios.

Cabe aclarar que los parámetros considerados en esta fase pueden variar constantemente, por lo que el análisis debe reflejar siempre los que generan mayor riesgo. Por ejemplo, la VMA, que es la velocidad máxima autorizada en km/h para un vehículo ferroviario, puede variar en función del sentido de circulación de los trenes y de las restricciones técnicas de vía impuestas por diferentes escenarios.

Tabla 3. Formulario de relevamiento de datos de PAN

Formulario de relevamiento de datos		
Datos de registro	Identificación del PAN	
	Nombre del PAN	
	Municipio	
	Estado	
	km	
Características físicas del PAN	Longitud del PAN	12,00
	Ángulo de cruce	90,00
	Característica de acceso al PAN	A nivel
	Rampa máxima de aproximación de la vía pública (%)	0,00
		Inferior al 3 %
	Longitud de la rampa	0,00
	Factor de corrección del tiempo adoptado	1,40
	Contiene electrificación	Sí
	Visibilidad del margen derecho de la vía (sentido ascendente)	300
	Visibilidad del margen derecho de la vía (sentido descendente)	300
	Visibilidad del margen izquierdo de la vía (sentido ascendente)	300
	Visibilidad del margen izquierdo de la vía (sentido descendente)	300
	Visibilidad	Inferior a 150 m
	Análisis de las condiciones de visibilidad en función de la velocidad del tren	Restricción o causa: visibilidad
Uso obligatorio de señalización activa		
Tipo de protección existente	Activa tipo 5	

Formulario de relevamiento de datos		
Características operacionales del modo ferroviario en el PAN	VMA ferroviaria - sentido ascendente	40 km/h
	VMA ferroviaria - sentido descendente	40 km/h
	VMA del tren más rápido (VMA ferroviaria)	Entre 40 y 80 km/h
	Número de líneas	1
		Vía única
	TD - Cantidad de trenes durante el día	15,35
TD - Cantidad de trenes durante la noche	15,35	
Características operacionales del modo automotor en el PAN	VMA en la vía pública (VMA en carretera)	Inferior a 50 km/h
	Número de carriles	3
		3 o más carriles
	Condiciones del pavimento	Regular
	Condiciones de iluminación	Eficiente
	Volumen de vehículos de paseo (vehículo + motocicletas)	Superior al 20 %
	Volumen de camiones	Hasta 5 %
	Volumen de ómnibus	Hasta 5 %
	Volumen de peatones	Superior al 20 %
	VD - Volumen de vehículos durante el día	16627,00
	VD - Volumen de vehículos durante la noche	5653,18
Longitud del vehículo (m)	22,00	
Historial de accidentes	N.º de accidentes con víctimas fatales	2
	N.º de accidentes con heridos	3
	N.º de accidentes con daños materiales	0
	Factor ponderado de accidentes (FPA)	29,50
	Nivel de seguridad (INS)	97,29

Fuente: elaboración propia

A partir de los datos recogidos, se realizaron los cálculos necesarios para determinar el impacto generado por la visibilidad en el área del cruce, con el tipo de protección que se debe aplicar. De acuerdo con la NBR 15680 (ABNT, 2017), el cálculo de la distancia de visibilidad es determinante para la necesidad o no de señalización pasiva. Si los valores existentes son inferiores a la distancia mínima de visibilidad, se torna obligatorio el uso de señalización activa, sea manual o automática.

Luego, se estimó el momento de circulación (MC) y el índice de criticidad (IC), de acuerdo con los criterios de la NBR 7613 (ABNT, 2019a). Tanto el MC como el IC representan numéricamente la intensidad de uso de un PAN. Sin

embargo, el MC solo correlaciona trenes y vehículos, mientras que el IC también tiene en cuenta los parámetros físicos existentes. Dando prioridad a la seguridad implicada en el cruce de un PAN, se sugiere comparar los valores del MC y del IC, y utilizar el valor más alto para definir el tipo de protección que debe aplicarse. Esto se debe a que cuanto mayor sea el valor IC/MC, mayor será el nivel de seguridad de la protección a ser aplicada.

Por último, se definió el tipo de protección a implementar en el PAN, siguiendo el Manual de Cruces de Carretera-Ferrocarril, que define las normas de protección y control existentes y aprobadas en Brasil. Así, conociendo el tipo de carretera y su categoría, relevada en la etapa 4 de este primer módulo, y con el valor resultante de la comparación del MC e IC, es posible definir el tipo de protección a aplicar y, consecuentemente, el tipo de control a utilizar (DENATRAN, 1987).

## Módulo II – Priorización de la demanda de adecuación de los PAN

El objetivo de este módulo es desarrollar un proceso que permita priorizar las inversiones en los PAN, con el fin de ayudar al proceso de toma de decisiones. Esta priorización es fundamental, ya que los recursos para este tipo de obras son limitados.

Para priorizar las inversiones en los PAN, el criterio utilizado fue la mayor divergencia entre la protección existente y el tipo de protección definido por la norma. Para cuantificar esta divergencia, se asignó una ponderación específica a cada tipo de protección, considerando que cuanto más sencillo es el tipo de protección, menor es el peso que se le atribuye.

Para ello, se estimó que la señalización pasiva se compone únicamente de elementos estáticos (carteles, señalización horizontal, entre otros), mientras que la señalización activa se caracteriza por ser el resultado de una acción, que puede ser manual (implementadas por señaleros/guardas) o automática (barreras, sistema de detección de trenes, etc.). Las ponderaciones para cada tipo de protección son: 1. Sin señalización; 2. Pasiva; 3. Activa; 4. Activa tipo 4; 5. Activa tipo 5.

Para cada PAN analizado, se verificó el peso del tipo de señalización exigido por la norma (NBR7613), restando de este valor el peso atribuido al tipo de señalización existente. Cuanto mayor sea el valor de esta diferencia, mayor será la prioridad atribuida a dicho PAN para su adecuación.

El módulo II se utilizó para definir las prioridades de adecuación de un PAN determinado en relación con el grupo analizado. Por lo tanto, para hacer el análisis aún más visual, fueron mapeados los posibles resultados (que son valores enteros que van de -4 a 4), con colores de gradación (de verde a rojo) para cada uno de ellos.

En la matriz que relaciona el tipo de protección existente con el tipo de protección exigido por norma, se propone un importante artificio visual que se utilizará para ayudar al proceso de toma de decisiones relacionado con la determinación de la prioridad de adaptación de los PAN. Así, mediante el análisis de la Tabla 4, se puede definir la prioridad que debe darse al PAN objeto de análisis.

Tabla 4. Matriz que relaciona el tipo de protección existente con el tipo de protección exigido por la norma

		Protección existente					
		Tipos	Activa tipo 5	Activa tipo 4	Activa	Pasiva	Sin señalización
Protección exigida por la norma	Activa tipo 5						
	Activa tipo 4						
	Activa						
	Pasiva						
	Sin señalización						

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4 se observa que se le dio la máxima prioridad (rojo más oscuro) a los casos en los que no hay señalización de ningún tipo y que, según la norma, deberían tener señalización "Activa tipo 5", y así sucesivamente. Para los casos en que el tipo exigido por la norma es inferior al existente, se sugiere que no se realicen cambios, ya que superan lo requerido.

Sin embargo, en función del número de PAN que haya que evaluar, puede resultar difícil establecer prioridades basándose únicamente en el resultado de esta diferencia, ya que los valores resultantes de la resta sugerida varían ligeramente, por lo que varios PAN de un mismo grupo pueden tener la misma prioridad.

En estos casos, además del proceso de priorización establecido por la divergencia entre el tipo de protección existente y la normalizada, también deberá evaluarse el historial de accidentes de cada PAN, contemplando el número de accidentes con víctimas fatales, accidentes con heridos y accidentes con daños materiales.

Para ello, se deben cruzar los datos de las empresas concesionarias y del organismo fiscalizador. A partir de esta información, se puede calcular el valor del Factor Ponderado de Accidentes (FPA), definido por Carmo et al. (2007), teniendo en cuenta el número de accidentes generados en un PAN en los últimos cinco años que hayan tenido víctimas fatales, heridos y accidentes con solo daños materiales.

Luego, se debe formular otra lista de prioridades para desempatar entre los PAN que obtengan la misma puntuación por la diferencia entre el tipo de protección existente y la exigida por la norma. De este modo, el PAN prioritario será el que tenga el FPA más alto.

El método propuesto fue evaluado por expertos en la materia. Tras su validación, fue aplicado de 2014 a 2020 a una muestra de más de 500 PAN existentes a lo largo de la traza ferroviaria de una empresa concesionaria de Brasil. Esta línea cruza importantes centros urbanos, por los que transitan volúmenes significativos de mercancías brasileñas destinadas a los mercados de exportación y al interior del país.

A lo largo de esta red, existen interferencias entre distintos modos de transporte (además del ferrocarril), aunque más de la mitad se producen entre el modo automotor y el modo ferroviario.

No obstante, para saber si una determinada intervención realmente aumenta la seguridad, y en qué medida; hay que probarla y verificar sus resultados (Pilkington, 2005). Dado que no es fácil llevar a cabo experimentos de esta naturaleza, primero se aplica la intervención y luego se observan y estudian los resultados obtenidos. En este estudio se utilizó una metodología de antes y después para evaluar la eficacia de las medidas aplicadas (Hauer, 1997).

## **Aplicación del método y análisis de los resultados de las acciones preventivas**

Inicialmente, para cada PAN de la red ferroviaria bajo análisis se estudiaron las características de identificación (nombre del PAN y municipio donde se ubica), las características operacionales del modo ferroviario (número de líneas, volumen de trenes, etc.) y las características operacionales del modo automotor (número de carriles, volumen de camiones, de ómnibus, etc.), así como el tipo de protección actualmente existente en dicho PAN. A continuación, se aplicó el método de análisis propuesto, comparando el tipo de protección existente con el definido por la norma, y se analizaron los datos históricos de accidentes con el fin de jerarquizar las inversiones y los lugares a priorizar.

La Tabla 5 muestra un ejemplo de cómo se aplicó el método a 10 de los 500 PAN que se analizaron y cómo se priorizaron las inversiones. Estos 10 PAN forman parte de la red ferroviaria de una concesionaria y están situados en centros urbanos con una alta densidad poblacional.

Tabla 5. Priorización de 10 PAN a recibir inversiones

PAN identificado	Estatus del PAN	Protección existente		Protección exigida por la norma		Diferencia
		Descripción	Ponderación	Descripción	Ponderación	
Muestra PAN - A	Irregular	Sin señalización	1,0	Activa	3,0	2,0
Muestra PAN - B	Irregular	Sin señalización	1,0	Activa tipo 4	4,0	3,0
Muestra PAN - C	Irregular	Pasiva	2,0	Activa	3,0	1,0
Muestra PAN - D	Irregular	Pasiva	2,0	Activa	3,0	1,0
Muestra PAN - E	Irregular	Pasiva	2,0	Activa tipo 4	4,0	2,0
Muestra PAN - F	Regular	Activa tipo 4	4,0	Activa	3,0	-1,0
Muestra PAN - G	Regular	Activa tipo 4	4,0	Activa tipo 4	4,0	0,0
Muestra PAN - H	Regular	Activa tipo 5	5,0	Activa	4,0	-2,0
Muestra PAN - I	Regular	Activa tipo 5	5,0	Activa tipo 4	4,0	-1,0
Muestra PAN - J	Regular	Activa tipo 5	5,0	Activa tipo 5	5,0	0,0

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 6 se expone un ejemplo de la aplicación de la matriz de colores (resultante de la diferencia entre lo exigido en la norma y lo existente), que determina la prioridad de adaptación de los PAN de la muestra. Se observa que inicialmente se priorizó el PAN identificado como "Muestra PAN - B", por ser el que presenta mayor discrepancia entre lo existente y lo normado.

Posteriormente, se les asignó prioridad a los PAN identificados como "Muestra PAN - A", seguidos de los "Muestra PAN - E", que no presentan señalización alguna. Por último, en función del número de accidentes, se priorizaron las muestras denominadas "Muestra PAN - D" y "Muestra PAN - C".

Tabla 6. Especificación de la protección exigida por la norma brasileña vs. protección existente

		Protección existente					
		Tipos	Activa tipo 5	Activa tipo 4	Activa	Pasiva	Sin señalización
Protección exigida por la norma	Activa tipo 5	Muestra PAN - J					
	Activa tipo 4	Muestra PAN - I	Muestra PAN - G			Muestra PAN - E	Muestra PAN - A
	Activa	Muestra PAN - H	Muestra PAN - F			Muestra PAN - D Muestra PAN - C	Muestra PAN - B
	Pasiva						
	Sin señalización						

Fuente: elaboración propia

Esta priorización representó una inversión de más de 5 millones de reales en las cinco señales activas instaladas. La Tabla 7 muestra la reducción del número de accidentes entre 2016 y 2019 para estos PAN. Los puntos resaltados en gris muestran los años de instalación.

Tabla 7. Reducción del número de accidentes mediante la inversión en los PAN priorizados por la metodología

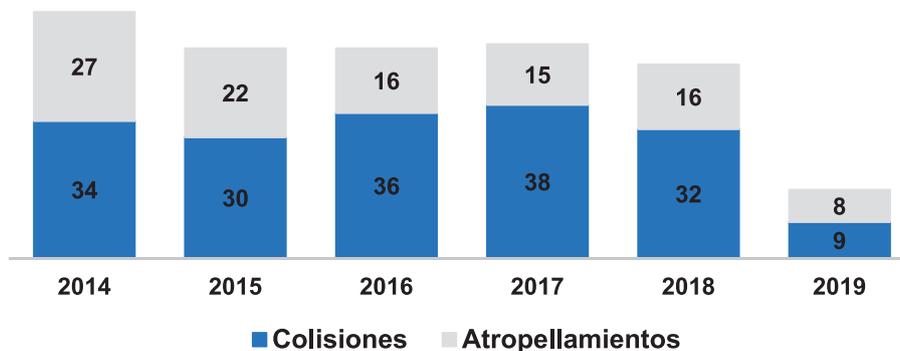
Ítem	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Muestra PAN - B	5	3	3	2	1	0
Muestra PAN - A	2	1	1	1	1	0
Muestra PAN - E	1	2	0	3	2	0
Muestra PAN - D	2	1	1	2	2	1
Muestra PAN - E	1	3	2	5	3	0

Fuente: elaboración propia

A lo largo de los años de aplicación del método expuesto, fue posible observar una reducción del número de sucesos como colisiones con vehículos y atropellamiento de peatones en los cruces ferroviarios priorizados, como se muestra en la Figura 2, que abarca el periodo comprendido entre 2014 y 2019.

Como puede verse, se produjo un descenso del 72 % en el número de ocurrencias entre 2014, cuando se aplicó por primera vez el método de análisis, y el año 2019. Este resultado refuerza la importancia y la eficacia de las inversiones realizadas en los PAN priorizados. También se observa que el número de colisiones se redujo un 74 % de 2014 a 2019, así como el número de atropellamientos de peatones, que disminuyó un 70 %.

Figura 2. Cantidad de colisiones con vehículo y atropellamientos de peatones en PAN entre 2014 y 2019



Fuente: elaboración propia

La baja de sucesos expuesta en la Figura 2 se debe a las inversiones realizadas por las concesionarias en los últimos años en materia de seguridad operacional (como la instalación de sistemas de protección activa para los cruces), basadas en el método propuesto, que compara el tipo de señalización existente y el tipo de señalización necesaria, además de las negociaciones legales y gubernamentales. Las campañas de concientización de la población sobre los peligros de cruzar imprudentemente un paso de peatones o cruzar indebidamente un PAN también desempeñan un papel esencial, ya que muchos accidentes están relacionados con la imprudencia de peatones y conductores.

Al aplicar la metodología a los ocho municipios con mayor siniestralidad en la red analizada, se observa una reducción en el número de accidentes. Como se destaca en la Tabla 8, el municipio 1 mostró los resultados más significativos en términos de reducción de accidentes (de 13 en 2014 a 0 en 2019). Esta ciudad cuenta con interferencia ferroviaria en toda su extensión territorial, alta densidad poblacional y gran representación económica en el contexto de su Estado.

En dicho municipio, las inversiones se priorizaron utilizando la metodología propuesta en dos PAN (Muestra PAN - B y Muestra PAN - E), que eran responsables del mayor volumen de accidentes en la ciudad. Como resultado, el número de accidentes se redujo, tras el mantenimiento y las obras, a cero en 2019.

*Tabla 8. Municipios con la mayor cantidad de colisiones y atropellamientos en PAN entre 2014 y 2019*

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<b>Municipio 1</b>	13	8	7	7	8	0
<b>Municipio 2</b>	7	4	9	8	1	0
<b>Municipio 3</b>	5	1	2	4	5	1
<b>Municipio 4</b>	4	2	2	7	3	1
<b>Municipio 5</b>	4	6	4	3	5	1
<b>Municipio 6</b>	3	0	5	1	5	2
<b>Municipio 7</b>	3	2	5	2	2	1
<b>Municipio 8</b>	3	3	4	1	2	1

*Fuente: elaboración propia*

Cabe señalar que el método de priorización de las intervenciones, además de reducir el número de accidentes, también aportó otros beneficios indirectos al municipio 1. Las intervenciones, a su vez, permitieron eliminar o reducir las restricciones de velocidad. De esta forma, fue posible aumentar la VMA del tramo, generando un menor impacto en el tráfico de la ciudad (ya que el PAN se despeja más rápidamente), garantizando ganancias para la operación y para la población que necesita circular por los PAN. El aumento de la VMA fue gradual, cada 5 km/h, junto con un trabajo de concienciación para que la comunidad pudiera adaptarse a la hora de llegada del tren al PAN y así evitar cruzar la carretera de forma imprudente.

Además, el aumento de la VMA en el tramo estudiado permitió a los trenes alcanzar mayores velocidades y, por lo tanto, circular más rápido, reduciendo el tiempo del ciclo. A la velocidad anterior de 30 km/h, el tren necesitaba un promedio de 3 minutos para cruzar el PAN. Ahora, a una velocidad de 50 km/h, el tren necesita un promedio de 1 minuto y 55 segundos. Esta reducción también se refleja en una mayor satisfacción de los clientes, ya que garantiza entregas más rápidas de la carga.

La reducción del ciclo garantiza una disminución del número de activos en circulación (al menos dos locomotoras modelo AC44 y 136 vagones), lo que genera los siguientes beneficios: menor impacto en el tráfico en áreas urbanas (menor cantidad y tiempo de impacto), disminución de ruidos emitidos por el tráfico ferroviario, menor frecuencia de mantenimiento de la vía principal y del material rodante y menor consumo de combustible.

El ciclo completo del tren (circulación de un tren vacío más un tren cargado), que recorre aproximadamente 1500 km, consume una media de 25.000 litros de diésel. Así, el aumento de la VMA, permitido por el uso de una señalización adecuada, puede garantizar la reducción del ciclo del tren y, por lo tanto, contribuir a la reducción en el consumo de combustible.

Cabe señalar que el método utilizado en este trabajo fue presentado en un foro técnico al que asistieron representantes y especialistas de las concesionarias brasileñas, incluidos los tres especialistas que realizaron el estudio. Hubo un consenso común entre los representantes de que el uso del método propuesto mejoraría el proceso de priorización de las intervenciones en los PAN en comparación con el proceso empírico que utilizan.

Se destacó la importancia de registrar este método basándose en normas nacionales e internacionales, lo que facilita su reproducción en otras trazas ferroviarias, independientemente de su ubicación. Además, se subrayó la importancia de que la metodología complemente las normas de Brasil, ya que algunas de estas no están estandarizadas ni reguladas.

## Conclusiones

La normativa brasileña sobre señalización en pasos a nivel es antigua y está dividida en diferentes normas. En consecuencia, resulta necesario actualizar la legislación, incluir la información pendiente (debido a los cambios estructurales del transporte a lo largo del tiempo) y directrices/sugerencias para verificar la señalización existente.

El objetivo de este trabajo consiste en consolidar las normativas brasileñas sobre el tema de la señalización en los PAN e incluir etapas basadas en documentos internacionales, que puedan contribuir a una mayor fiabilidad en la elección de la señalización adecuada para cada PAN. En la propuesta de metodología se incluyeron etapas que van desde el relevamiento y análisis de datos, el cálculo de indicadores y la asignación de ponderaciones para la elección del tipo de señalización y la priorización de las inversiones.

Los resultados del método desarrollado en este trabajo mostraron que los criterios internacionales (de Estados Unidos, Australia y Canadá), vinculados a las normas reglamentarias brasileñas, se complementaban entre sí y reforzaban la importancia de la asertividad a la hora de priorizar el mantenimiento en los PAN críticos, considerados de alto riesgo. Más del 60 % de los accidentes ferroviarios en Brasil ocurren entre vías férreas y carreteras en PAN, y la principal causa es la imprudencia de conductores y peatones (ANTT, 2015).

La aplicación del método propuesto, junto con la ejecución de campañas de concientización en la red ferroviaria analizada, permitió reducir en un 72 % los accidentes en general, en un 74 % las colisiones con vehículos y en un 70 % los atropellamientos con peatones. También se obtuvieron otros beneficios, como un aumento de la VMA en determinados tramos, lo que se tradujo en una reducción del número de trenes en circulación, así como un menor impacto en el tráfico en las zonas urbanas y una reducción de los riesgos y accidentes. La reducción del número de trenes en circulación también contribuye a reducir el consumo de combustible, lo que equivale a una disminución de las emisiones contaminantes.

El uso de una señalización adecuada tiene un impacto positivo en la sociedad al reducir los riesgos para los coches y los peatones, como el número de accidentes, el ruido y el impacto en el tráfico. También tiene un impacto económico, por ejemplo, una reducción de las compensaciones a la sociedad, menos mantenimiento de los activos (material rodante) y, en consecuencia, menos combustible. Por último, las mejoras medioambientales están relacionadas con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos de las locomotoras.

Cabe señalar que el presupuesto anual de una empresa ferroviaria es un factor limitante para la inversión en pasos a nivel. Por lo tanto, el método propuesto contribuye a una decisión más asertiva en cuanto al uso de los recursos disponibles. Así, se deberían reevaluar anualmente los lugares más críticos y priorizar las inversiones para los años (o periodos) siguientes. Además, las decisiones presupuestarias pueden influir directamente en la solución, ya que la gestión puede optar por destinar sus inversiones a otras necesidades.

Los efectos beneficiosos para la empresa y la sociedad quedan asegurados mediante la aplicación de la metodología propuesta, con base en los datos de la reducción de accidentes tras la realización de obras en zonas clasificadas como críticas y sin señalización adecuada.

No obstante, cabe señalar que este estudio utilizó la metodología del antes y el después para analizar la eficacia de las medidas empleadas, por lo que no es posible afirmar con exactitud que los resultados obtenidos no se deban también a otros factores, como tendencias generales de reducción de accidentes o incluso a otras contingencias.

Con el fin de profundizar este trabajo, se proponen nuevos estudios para automatizar la verificación de los tipos de señalización, si se ajustan a la norma, y la priorización de las inversiones. Se sugiere que futuros análisis adopten para superar estas limitaciones grupos de control de comparación y regresión (Elvik et al., 2015), así como la aplicación y validación del método por expertos de otras empresas ferroviarias de cargas, pasajeros y metro del país y del mundo.

La aplicación global del estudio deberá considerar la modificación de los parámetros a los practicados en la región y en el país, ya que el modelo propuesto se basa en normas brasileñas vigentes que tienen sus propias particularidades. Como la metodología se generó a partir de criterios ya adoptados internacionalmente, se facilita su expansión.

## Bibliografía

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019a). NBR 7613:2019: Via férrea - Travessia rodoviária - Determinação do grau de importância e momento de circulação. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=412488>

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 12180:2009: Via férrea - Travessia rodoviária - Passagem em nível pública - Equipamento de proteção elétrico. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=38399>

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 15680:2017: Via férrea – Travessia rodoviária – Requisitos de projeto para passagem em nível pública. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=382578>

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019b). NBR 15942:2019: Via férrea - Travessia rodoviária - Passagem de nível pública - Classificação e requisitos para equipamento de proteção. <https://www.abntcatalogo.com.br/>

Areosa, J. (2012). O contributo das ciências sociais para a análise de acidentes maiores: dois modelos em confronto. *Anál. Social*, 204, 558-584. [http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0003-25732012000300003&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0003-25732012000300003&lng=pt&nrm=iso)

ALCAM (2020). Australian Level Crossing Assessment Model – Australian Norm. <http://alcam.com.au/>

ANTT (2015). ANTT prepara resoluções para ampliar a fiscalização de ferrovia. <http://canalDOServidor.infraestrutura.gov.br/ultimas-noticias/3099-antt-prepara-resolu%C3%A7%C3%B5es-para-ampliar-a-fiscaliza%C3%A7%C3%A3o-de-ferrovia.html>

ANTT (2020). Agência Nacional de Transporte Terrestre. <http://www.antt.gov.br>

Carmo, R. C., Campos V.B.G., Guimarães J.E. (2007). Procedimento para Avaliação da Segurança de Passagens de Nível, Anais do XXI ANPET- Congresso de Ensino

e Pesquisa. Rio de Janeiro, RJ. Carmo, R. C.; Lopes, L. A. S. e Campos, V. B. G. (2012). Análise de práticas para implantação do gerenciamento de atrito em uma ferrovia. Em XXVI ANPET. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2012. Joinville: DECTI. v. 1.

Castillo, R. (2007). Agronegócio e Logística em áreas de cerrado: expressão da agricultura científica globalizada. *Revista da ANPEGE*, 3, 33-43.

DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito (1987). Manual de Cruzamentos Rodoferroviários. Coleção Serviços de Engenharia. Brasília, DF.

Elvik, R.; Høy, A.; Vaa, T.; Sørensen, M. (2015). O Manual de Medidas de Segurança Viária. Madrid: Fundación Mampfre.

Ferreira, M. B. M. e Almeida, R. L. (2006). Módulo 10 Estudos de Caso: Avaliação de Riscos de Ferrovias. Apostila fornecida aos participantes dos cursos de Estudo de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos para técnicos do Ministério do Meio Ambiente, IBAMA e OEMAs. Rio de Janeiro, RJ.

Furtado, A. R. (2012). Metodologia seis sigma como estratégia de melhoria de processo e redução de acidentes ferroviários. Monografia (graduação). Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Juiz de Fora, MG.

Hauer, E. (1997). Observational Before-After Studies In Road Safety, Estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety. Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Jusbrasil (2020). Artigo 90 da Lei n.º 9.503 de 23 de setembro de 1997. <https://www.jusbrasil.com.br/topicos/10616742/artigo-90-da-lei-n-9503-de-23-de-setembro-de-1997>

Peron, P. P. F. (2016). Passagem em Nível: Proposta de um modelo de Categorização e Sinalização. Dissertação (mestrado). Instituto Militar de Engenharia -IME. Rio de Janeiro, RJ.

Pilkington P. e Kinra, S. (2005). Effectiveness of speed cameras in preventing road traffic collisions and related casualties: systematic review. *BMJ*, 330(7487), 331-334. <https://doi.org/10.1136/bmj.38324.646574.AE>

Queensland Transport (1999). Level Crossing Risk Scoring Matrix. Manual produced by the Level Crossing Safety Steering Group. Australia.

Raub, R. A. (2006). Examination of Highway-Rail Grade Crossing Collisions Over 10 years in Seven Midwestern States. *ITE Journal*, 76(4), 16-26.

Ribeiro, G. V. (2011). Uma Contribuição metodológica ao atendimento emergencial em ferrovias. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

Saccomanno, F. F.; Park, P. Y.-J.; & Fu, L. (2006). Analysis of Countermeasure Effects for Grade Crossings. 9th International Level Crossing safety and Trespass Prevention Symposium, Montreal.

Silva, R. de O. (2010). Mapeamento de vulnerabilidade ambiental para o gerenciamento de riscos nos transportes ferroviários de produtos perigosos. Dissertação (mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). San Pablo, SP.