

Article

Modelado de la seguridad operacional en el eje vial de la Calle 13: Un análisis de accidentes de carga pesada utilizando el marco de resonancia funcional (FRAM)

Sonia Meneses^{1*}, Cristian Soto², Jaisson Vásquez³

Citation: Meneses, S., Soto, C. & Vásquez, J. (2025). Modelado de la seguridad operacional en el eje vial de la Calle 13: Un análisis de accidentes de carga pesada utilizando el marco de resonancia funcional (FRAM). Proceedings of the 2025 Academy of Latin American Business and Sustainability Studies (ALBUS), San Miguel, El Salvador.

<https://doi.org/10.70469/ALBUS.16>



Copyright: © with the authors. This Open Access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).

1 Universidad Libre, Colombia, sonial.menesesv@unilibre.edu.co

2 Universidad Libre, Colombia, cristian-sotom@unilibre.edu.co

3 Universidad Libre, Colombia, jaissonj-vasquezm@unilibre.edu.co

Resumen: El presente artículo tuvo como objetivo identificar las diferentes causas de los accidentes viales en los que participan vehículos de carga de la calle 13 de Bogotá, utilizando el método sistemático FRAM (2012). Con un enfoque de método mixto, en el que se combinó el análisis cuantitativo de los informes oficiales de accidentes de la Secretaría Distrital de Movilidad con la modelación cualitativa de las funciones del sistema para identificar puntos de resonancia de dichas funciones y determinar cuáles eran críticas en el corredor vial. Se identificaron alteraciones funcionales e interacciones que influyen en la difusión de accidentes; estas resaltan factores como exceso de velocidad, acción imprudente por agente externo y condiciones del conductor. También se identificó un sesgo en la información de la Secretaría de Movilidad al abordar la accidentalidad. La perspectiva sistemática reconoce la complejidad del transporte y lo limitado de los enfoques tradicionales; también permite identificar las áreas críticas al comprender cómo la variabilidad permite implementar estrategias preventivas orientadas a la seguridad vial y la optimización del transporte de carga.

Palabras Clave: Accidente, conductor, distorsión, movilidad, preventivo.

1. Introducción

La siniestralidad vial es una problemática global que se manifiesta con especial gravedad en los países de ingresos medios, como Colombia. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, los accidentes de tráfico representan una de las principales causas de muerte en el mundo; cada año más de 1,35 millones de personas pierden la vida en un accidente de tránsito, afectando especialmente a los usuarios vulnerables de la vía (Granados León et al., 2014). En este contexto, las vías urbanas han concentrado un alto flujo vehicular y, en las zonas con un alto nivel de actividades económicas, se convierten en puntos críticos que requieren una mayor atención desde la perspectiva de la seguridad vial. (Alcaldía, Secretaría Distrital de Movilidad, 2020)

Bogotá, al ser capital del país, se convierte en el centro logístico y productivo, presentando una infraestructura vial que se exige al límite para el transporte de carga. La Avenida Calle 13 se ha constituido como uno de los principales corredores logísticos de la ciudad, que conecta actualmente zonas industriales y comerciales con el occidente del país. (Jarrín Quint et al., 2021) Sin embargo, este alto nivel de actividad también ha derivado en una elevada tasa de siniestralidad, particularmente en lo que respecta a los camiones de carga pesada, con un 34% de los vehículos que transitan por esta vía de la ciudad, lo que la convierte en una ruta prioritaria para estos vehículos. Según fuente oficial de Corabastos, en Bogotá se moviliza al mes 247.719 toneladas de alimentos, con un acumulado de 1.463.053 en el primer semestre del 2025, con un incremento de 4.2% frente al primer semestre 2024, de las cuales circulan por la calle 13 (Corabastos, 2025). A esto se suman horarios de circulación con restricciones mínimas y la ausencia de una gestión integrada del riesgo vial.

La notabilidad de esta problemática no se encuentra limitada por la cantidad de accidentes registrados, sino además por sus consecuencias sociales, económicas y ambientales. Cada siniestro vial puede llegar a implicar

pérdidas humanas, afectar la salud pública de su entorno, interrumpir los procesos logísticos urbanos y llegar a incrementar niveles de contaminación (Brito Lopes et al., 2024). Ante este tipo de escenarios, se necesita un enfoque que permita comprender y entender la complejidad de los factores que se involucran y proponer soluciones que vayan más allá de identificar causas aisladas.

El tiempo ha mostrado que los análisis tradicionales de accidentes se han basado en modelos lineales de causa y efecto. Pero dada la experiencia, se ha demostrado que los sistemas de transporte y movilidad presentan comportamientos complejos, donde los accidentes surgen de la interacción simultánea de aspectos humanos, técnicos, organizacionales y ambientales (González Pérez et al., 2011). Es por ello que la metodología Método de Análisis de Resonancia Funcional (FRAM) (Hollnagel, 2012), se constituye como una nueva alternativa que integra y comprende las dinámicas de los sistemas complejos y explica cómo funciones cotidianas pueden amplificarse hasta resultar en eventos adversos (siniestros viales), (Montoya Valero, 2017) (hse software, 2021). Este enfoque ha resultado esencialmente en un medio para abordar la causalidad de múltiples eventos que caracterizan a los siniestros de tránsito.

2. Metodología

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, cuantitativo, interpretativo y descriptivo. Se utilizaron fuentes secundarias, como el Observatorio de Movilidad de Bogotá, el Anuario de Siniestralidad Vial y estudios internacionales, para recolectar datos relevantes sobre accidentes con camiones y los distintos involucrados. (Guzmán Peña, 2025).

En la siguiente tabla se describe un hecho de hipótesis generado a través de la información suministrada por movilidad; dicha información fue solicitada a través de un medio oficial, dado que la correlación de los datos no se había generado por completo en el SIGAT. Esta información fue analizada y clasificada según los datos ocurriendos dados sobre la accidentalidad de la calle 13 de Bogotá, en donde se involucran camiones de carga. (Guzmán Peña, 2025).

Tabla 1. Clasificación de accidentes por hipótesis, vehículo de carga como actor principal del siniestro vial

Hipótesis de accidente	Cantidad	%
Otra (conductor en general)	102	34%
No mantener distancia de seguridad (conductor en general)	53	18%
Transitar entre vehículos (ciclista o motociclista)	45	15%
Adelantar cerrando (conductor en general)	20	7%
Adelantar por la derecha (conductor en general)	12	4%
Girar bruscamente (conductor en general)	9	3%

Fuente: SIGAT – Elaboración: Propia

Como se evidencia en la tabla 1 de accidentalidad, se identifican las hipótesis con mayor frecuencia cuando el conductor del vehículo de carga es el principal actor vial en el siniestro, teniendo en cuenta que la hipótesis otra (conductor en general) evidencia una mayor frecuencia y se determina como un dato sesgado, ya que la información suministrada por movilidad no es clara en esa hipótesis descrita, dejando en sí una incógnita a la hora de generar un análisis más completo ante la causa del siniestro. (Palacio, 2024).

Tabla 2. Clasificación de accidentes por hipótesis, vehículo de carga como actor secundario del siniestro vial

Hipótesis de accidente	Cantidad	%
Transitar entre vehículos (ciclista o motociclista)	37	32,46%
No mantener distancia de seguridad (conductor en general)	24	21,05%
Otra (conductor en general)	22	19,30%
Adelantar por la derecha (conductor en general)	10	8,77%
Adelantar cerrando (conductor en general)	5	4,39%

Fuente: SIGAT – Elaboración: Propia

En la Tabla 2 se analiza la clasificación de involucrados de la base de datos del SIGAT ante la accidentalidad de la calle 13; el mayor porcentaje está dado a los ciclistas y motociclistas (Cabrales et al., 2020) (Arshad et al., 2023), los cuales presentan un mayor rango de accidentalidad, seguidos de imprudencias de los conductores al no mantener la distancia adecuada entre vehículos al hacer su recorrido e incluso hasta en el tráfico. De igual manera,

se siguen evidenciando datos sesgados, como lo es otra (conductor en general), donde no se especifica un involucrado directo, dejando una incertidumbre de los datos generados. (Palacio, 2024).

Uno de los factores clave de accidentalidad en la Tabla 2, como lo es la distancia de seguridad, se determina como un factor clave al momento de efectuar la conducción; al no determinarlo, puede influir en otra secuencia de eventos. Diversos estudios determinan la distancia en tres factores denominados: distancia mínima de seguridad, distancia de seguridad básica y distancia de seguridad suficiente. Estas clasificaciones denotan unos parámetros que las definen a profundidad (Lißner & Reh, 2023).

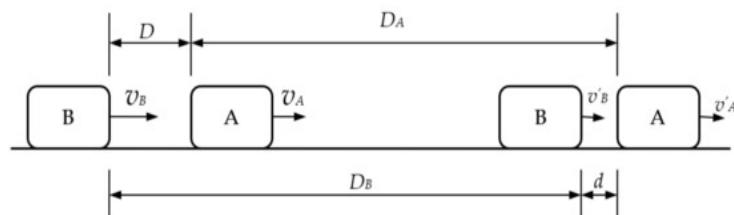


Imagen 1. Distanciamiento de vehículos, escenarios de distancia y frenado. Fuente: Applied Sciences (transporte y movilidad futura)

Este escenario de la Imagen 1 termina en que los vehículos deben mantener una distancia al momento de la conducción de manera adecuada, tanto en velocidad como en frenado, ya que, si no se respetan estos factores, serán propensos a un accidente seguro. Se supone que el conductor del vehículo B frena al observar el frenado del vehículo A; la distancia del vehículo A disminuye a V' ; asimismo, la distancia recorrida del vehículo B también disminuye a V' . B es D_B . La simbología D (m) representa la distancia entre los vehículos A Y B cuando alcanzan la velocidad posterior al frenado, V' A y V' B, según lo requerido por el diseño. (Fu & Wu, 2023)

Fórmula que determina la distancia de frenado entre vehículos D (Fu & Wu, 2023)

$$D_A = D_{A2} + D_{A3} = V_A \frac{t_3}{2} + \frac{V_A^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j A \max}{24} t_3^2$$

Distancia mínima de seguridad D1: La distancia de seguridad se calcula considerando la respuesta del conductor en el vehículo A y el tiempo de frenado. (Fu & Wu, 2023)

$$\begin{aligned} D_1 &= D_B + d - D'_A \\ &= V_B(t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2}) + \frac{V_A^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j A \max}{24} t_3^2 - (V_A \left(t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} \right) + \frac{V_A^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j A \max}{24} t_3^2) + d \\ &= (t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2}) (V_B - V_A) + \frac{V_B^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{V_A^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j B \max}{24} t_3^2 + \frac{j A \max}{24} t_3^2 + d \end{aligned}$$

Distancia de seguridad básica D2: El conductor del vehículo que le sigue, “vehículo B”, frenará solo después de identificar las luces de freno del vehículo delantero, reduciendo la distancia que recorre el vehículo A antes de que el vehículo reaccione. Reflejando en esta fórmula la distancia mínima entre el Vehículo A y el Vehículo B antes de que frenen para evitar una colisión inminente. (Fu & Wu, 2023)

$$\begin{aligned} D_2 &= D_B + d - D_A \\ &= V_B(t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2}) + \frac{V_B^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j B \max}{24} t_3^2 - \left(V_A = \frac{t_3}{2} \right) + \frac{V_A^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j A \max}{24} t_3^2 + d \\ &= V_B(t_1 + t_2) + (V_B - V_A) + \frac{V_B^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{V_A^2 - V'^2}{2j A \max} - \frac{j B \max}{24} t_3^2 + \frac{j A \max}{24} t_3^2 + d \end{aligned}$$

Distancia de seguridad suficiente D3: La desaceleración $j A \max$ del vehículo puede tender a ∞ . $j A \max = \infty$. Puede ocurrir si el vehículo choca o la frenada ocasiona un derrapamiento; considerando la velocidad inicial V_A del vehículo A, se convierte en 0 en el Instante, en este caso $D_A = 0$ por lo que puede tener una separación segura entre vehículos. (Fu & Wu, 2023)

$$D_3 = V_B (t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2}) + \frac{V_B^2 - V_B'^2}{2j_A \max} + \frac{j_B \max}{24} t_3^2 + d$$

Esta fórmula es el requisito de la distancia de seguridad cuando el vehículo B debe frenar en las condiciones más desfavorables, “es decir, si el vehículo delantero choca de manera repentina”. Esto es denominado distancia de seguimiento desfavorable. (Fu & Wu, 2023)

Asimismo, se incluyó el análisis de datos estadísticos mediante un mapa de calor, que detalla la concentración por localidad de siniestros de camiones de carga en la Calle 13, Bogotá. La cantidad de siniestros por año determina la fatalidad de los accidentes en donde los involucrados han sido gravemente heridos o fallecidos.

Tabla 3. Mapa de calor representada por año

Localidad	Año					
	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Fontibon	19	24	31	29	34	18
Kennedy	2	0	2	5	2	2
Puente aranda	4	11	14	10	7	5
Los martires	2	0	2	2	0	0

Fuente: SIGAT – Elaboración: Propia

En la Tabla 3 se presenta la accidentalidad vial con participación de vehículos de carga en cuatro localidades de Bogotá (Fontibón, Kennedy, Puente Aranda y Los Mártires) por donde cruza la avenida calle 13, durante el periodo 2020–2025 (Guzmán Peña, 2025); en la localidad de Fontibón, con mayor número de casos en todos los periodos. Podemos observar dos años con variaciones de menor accidentalidad que en otros años, en el caso del 2020 fue el año de la pandemia por lo cual fue un año atípico, por otro lado en el 2025 aparece un registro 18 accidentes que no son una reducción sino la cantidad de accidentes registrados hasta el 15 de julio de 2025, (Guzmán Peña, 2025) fecha a la cual se tuvieron en cuenta registros para realizar el informe solicitado a Movilidad, debemos tener en cuenta el año 2021 año donde se comienza a normalizar el flujo de vehículos por este corredor vial, que aunque no tiene un número alto como los siguientes años sigue siendo muy alto para el periodo de recuperación económica después de la pandemia. Fontibón concentra gran parte de la actividad logística de la ciudad (terminal de carga, corredor Calle 13, proximidad al aeropuerto, Zona Franca, Corabastos), lo que explica la alta incidencia. (Corabastos, 2025)

3. Caracterización

Para poder entender un poco más esta problemática de salud pública a nivel mundial, se explicará a través de la caracterización que no solo toma en cuenta el corredor vial de la calle 13, sino que también se explica a través de diferentes estudios encontrados. La Calle 13 en Bogotá es una vía arterial que conecta el occidente de la ciudad con su centro urbano, extendiéndose desde el límite con el municipio de Mosquera hasta la Carrera 14 en la localidad de Santa Fe. Tiene una longitud aproximada de 11,5 kilómetros y atraviesa localidades como Fontibón, Kennedy, Puente Aranda, Los Mártires y Santa Fe. El corredor es estratégico para el transporte de carga debido a su proximidad a zonas industriales y logísticas, además de ser una ruta de entrada y salida de mercancías desde y hacia el occidente del país (Jarrín Quint et al., 2021) Según datos de la Secretaría de Movilidad.

La actividad logística en la Calle 13 se desarrolla principalmente durante las franjas horarias de 08:00 a.m. a 17:00 p.m. y de 20:00 p.m. a 06:00 a.m., con restricciones mínimas a la circulación de vehículos de carga, según lo establece el Decreto 077 de 2020. Lo que genera picos con alta congestión (Castro et al., 2024), Asimismo aumentando el riesgo de siniestros dado que la vía es compartida con agentes viales como carros de uso particular, motos y ciclistas. (Jeppsson & Schindler, 2024) (Guzmán Peña, 2025).

A nivel urbano, la vía limita con infraestructuras críticas como la Avenida Ciudad de Cali, la ALO Sur y diversos centros logísticos y de distribución. El flujo vehicular constante, combinado con el estado de deterioro de la malla vial y la falta de medidas efectivas de regulación, contribuye a un incremento constante en los índices de accidentalidad en los últimos años. (Alfonso Wilches et al., 2023).

El análisis de las diferentes variables permite establecer un perfil del entorno que detalla lo físico, funcional y organizacional del sistema vial en estudio, lo que resulta funcional en la aplicación del modelo FRAM (2012) (Hollnagel, 2012) y la formulación de propuestas orientadas a la mitigación del riesgo vial. (Montoya Valero, 2017).

Como se puede observar en la Figura 1. Tabla 3: La cantidad de siniestros por año determina la fatalidad de los accidentes en donde los involucrados han sido gravemente heridos o fallecidos.



Imagen 2. Mapa de siniestros graves agregados, ocurridos en la calle 13 desde el año 2020 a 2025 con corte al 15 de julio. Fuente: SIGAT – Elaboración: SDM-DIM. Fecha de consulta: 23/07/2025 – Fecha de corte: 15/07/2025

Diversos estudios han abordado la problemática de la siniestralidad vial desde perspectivas estructurales, humanas y tecnológicas. Según la Organización Mundial de la Salud, los accidentes de tránsito constituyen una de las principales causas de muerte en el mundo, siendo los usuarios vulnerables de la vía, peatones, ciclistas y motociclistas los más afectados (Granados León et al., 2014) La siniestralidad vial ha evolucionado desde enfoques lineales hacia perspectivas sistémicas que consideran la interacción compleja de múltiples factores. En este marco, diversos estudios han abordado los riesgos asociados al transporte de carga pesada en entornos urbanos e interurbanos del comportamiento humano y condiciones tecnológicas (Bella et al., 2024) (Amini et al., 2021).

Por ende, se analizarán los diferentes estudios encontrados en medio de nuestra investigación, ya que esto nos permite determinar de alguna manera las diferentes causales que pueden provocar un accidente. El riesgo asociado a una maniobra de adelantamiento es el resultado de una compleja interacción entre el conductor, el vehículo, la infraestructura vial y el entorno asociado al tráfico. El factor humano es la causa principal en más del 90% de los accidentes de tráfico, siendo la maniobra de adelantamiento un contexto de juicio erróneo si no es utilizada con la precaución debida según normas o enseñanzas al conducir, convirtiéndose en un comportamiento de percepción del riesgo percibido y del riesgo objetivo. (Himmels et al., 2024).

La decisión de adelantar se basa en la percepción subjetiva del conductor sobre la seguridad de maniobra. Investigaciones indican que los conductores prefieren una maniobra con larga distancia de arranque y una corta duración (Chen et al., 2018); sin embargo, esta medida de percepción es dada a un contexto, ya que esta es más arriesgada en la noche. (Amini et al., 2021) La conducción aberrante hacia el exceso de velocidad, la conducción distraída, la fatigada y las maniobras agresivas son síntomas de una siniestralidad segura, en el caso de conductores de larga distancia que, por la presión de cumplir horarios de entregas, (Marisamynathan & Shandhana Rashmi, 2024), las largas jornadas y la fatiga acumulada, inducen al comportamiento transgresor. (León González, 2024)

Todo esto afecta la seguridad y el tiempo de la reacción del conductor, siendo esta más lenta en una situación de emergencia.

Los vehículos pesados o camiones de carga introducen variables únicas que redefinen la matriz de riesgo debido a su operación y gran tamaño, pero las maniobras bruscas al volante, especialmente a altas velocidades, son un riesgo latente que aumenta exponencialmente la gravedad de los accidentes. El constante tráfico sectorizado de la ciudad y la no prudencia de agentes viales externos hace que los conductores generen frenados intensos que pueden provocar el desplazamiento de la carga a la parte delantera alterando la carga de los ejes convirtiéndola en una sobre carga hacia a delante lo que provoca la inestabilidad al momento del frenado generando que el vehículo de carga haga un desplazamiento mayor en su momento de frenado (Chen et al., 2025), además los sistemas de frenos de aire son complejos y susceptibles a fallos que representan el 31.4% de las infracciones técnicas de en vehículos pesados (Hou et al., 2023), a esto la característica operativa como la longitud, masa, capacidad de aceleración y puntos ciegos dificultan las maniobras y aumentan la probabilidad y severidad de colisiones de lo cual tiene un 61.7% de probabilidad de ser fatal. (Jurecki & Poliak, 2023) (Cantisani et al., 2025).

La infraestructura vial y el entorno de tráfico son factores claves que determinan variables que pueden influir en un accidente, lo que lleva a los conductores a intentar adelantamientos en tramos o zonas no permitidas, estos actores como ciclistas o motociclistas son vulnerables en una vía donde transitan camiones de carga son participes de una tasa alta de accidentalidad con un grado de mortalidad muy elevado (Chen et al., 2024), gran parte de estos conflictos ocurren en las intersecciones, maniobras de giro, adelantamientos y velocidades excesivas por parte de agentes viales donde el involucrado camión de carga tiene varios factores en donde al uso del vehículo en su punto más vulnerable genera varios puntos ciegos (King et al., 2009).

Uno de los principales aportes ha sido realizado por Hollnagel, quien desarrolló el método de resonancia funcional (FRAM) (2012), una herramienta conceptual que permite modelar la variabilidad funcional de sistemas complejos. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en sectores como la aviación, la energía y recientemente en el análisis de seguridad vial, al considerar que los accidentes pueden surgir no por fallos individuales, sino por interacciones inesperadas entre funciones normales, adicionalmente estudios como el de Miaou han demostrado una relación estadísticamente significativa entre el diseño geométrico de las vías y la frecuencia de accidentes con camiones (Miaou, 1994), proponiendo modelos como poisson y binomial negativa para su análisis, esta línea cuantitativa ha sido complementada por investigaciones de tipo epidemiológico, como la de Asour, que identificó una asociación entre trastornos musculo esqueléticos y la ocurrencia de accidentes en conductores profesionales (Li et al., 2023).

Desde el punto de vista del comportamiento humano, el insomnio y la fatiga crónica constituyen factores determinantes en la accidentalidad de conductores de carga, hallazgos que coinciden con la problemática observada en corredores humanos como la calle 13. Asimismo, Kuran introdujo el concepto de “comportamiento no conforme adaptativo” (Beanland et al., 2022), sugiriendo que los individuos ajustan sus decisiones según presiones del entorno, lo cual incrementa la probabilidad de desvíos funcionales cuando no existen controles eficaces. En el contexto colombiano, la Secretaría de Movilidad ha documentado ampliamente la concentración de siniestros viales en zonas como Fontibón y Kennedy, atribuyéndolos a condiciones deficientes en infraestructura, escaso control operativo y elevada densidad vehicular. Estos datos son fundamentales para contextualizar localmente las resonancias funcionales planteadas por el método de resonancia funcional (FRAM) (2012).

En conjunto, estos estudios sostienen que la siniestralidad vial asociada al transporte de carga debe abordarse desde una perspectiva multifactorial, reconociendo tanto las condiciones físicas del entorno como las dinámicas funcionales del sistema de movilidad, lo cual justifica el uso de metodologías sistémicas como la empleada en el presente trabajo.

4. Resultados.

El análisis desarrollado a partir del método de resonancia funcional (FRAM) (2012) permitió comparar el modelo ideal de conducción segura con dos escenarios de distorsión propuestos por la Secretaría de Movilidad: adelantar cerrando y no mantener la distancia de seguridad. En ambos casos, el contraste entre el funcionamiento esperado del sistema y las variaciones introducidas evidenció que los siniestros viales no responden a un único error aislado, sino a la interacción simultánea de múltiples factores humanos, técnicos, organizacionales y ambientales. (Jurecki & Poliak, 2023).

El método de resonancia funcional (FRAM) (2012) es un enfoque sistemático que dispone de unas características que nos permiten interactuar con diferentes variables, creando una descripción o representación de cómo se lleva a cabo una actividad de forma habitual; esta representación se denomina FRAM (2012). Se describen las funciones necesarias de cada actividad, donde se da una descripción concisa y sistemática, permitiendo alcanzar un objetivo. Las funciones se pueden describir en términos de seis aspectos: Entradas, Salida, Requisitos,

Recursos, Control y Tiempo: las funciones deben conectarse siempre con una entrada y una salida en su red de todas las funciones, ya que esto permite interactuar con la red sistémica (Hollnagel, 2012).

Entrada (I): Representa la información como una señal subsiguiente, siendo un resultado en la condición de la función a una salida de otra función.

Salida (O): Describe un aspecto con el cual se define una entrada de una señal para iniciar o continuar con los enlaces a funciones descendentes.

Recurso (R): Es la ejecución de condiciones de lo que necesita la función cuando está activa.

Control (C): Es la regla de función que supervisa los procedimientos, pautas, planes u otras funciones acordes con lo que se está modelando.

Tiempo (T): Esta es una función de relación temporal que representa las diversas maneras en que el tiempo puede afectar el desempeño de una función.

Precondición (P): Función previa a una condición que debe cumplirse antes de una función y que se puede llevar a cabo.

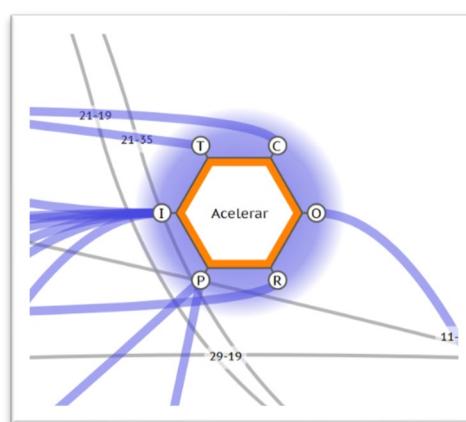


Imagen 3. Función de resonancia FRAM (2012) (Acelerar).

4.1 Función Acelerar

Entradas (I): provienen de la función Vehículo en tránsito y del Cambio de marcha.

Precondiciones (P): disponibilidad de condiciones mecánicas y estado de la vía (superficie apta, ausencia de obstáculos inmediatos).

Recursos (R): potencia del motor, sistema de transmisión y respuesta del conductor.

Control (C): regulaciones de velocidad (límites de tránsito, señalización) y aplicar distancia de seguridad.

Salidas (O): culminar en la parada del vehículo; posteriormente, la fusión arriba al lugar de destino; esto indica que la distorsión generada no evita que se pueda cumplir con el proceso de conducción.

Interpretación: En el modelo, Acelerar está conectado como un factor potenciador de riesgo cuando la función aplicar distancia de seguridad falla o se distorsiona. Es decir, al aumentar la velocidad sin un control estricto de la distancia con el vehículo líder, se acorta el tiempo de reacción y se incrementa la probabilidad de un choque por alcance.

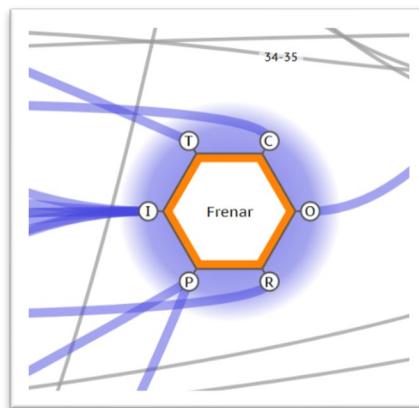


Imagen 4. Función de resonancia FRAM (2012) (Frenar).

4.2 Función Frenar

Entradas (I): Tiempo de reacción del conductor, identificación de la señal de tránsito y, de manera crítica, del estado de la vía y de la acción del agente externo en la vía (prudente o imprudente).

Precondiciones (P): distancia suficiente para detenerse, condiciones de adherencia de la vía y buen estado de los frenos.

Recursos (R): sistema de frenos, capacidad de respuesta física del conductor.

Control (C): normas de tránsito, aplicar distancia de seguridad, condiciones de seguridad del conductor.

Salidas (O): En el modelo, Frenar está conectado como un factor potenciador de riesgo cuando la función Aplicar distancia de seguridad falla o se distorsiona. Es decir, al disminuir la capacidad de frenado del vehículo sin un control estricto de la distancia con el vehículo líder, se acorta el tiempo de reacción y se incrementa la probabilidad de un choque por alcance.

Interpretación: En el modelo, Frenar está conectado como función correctiva dependiente de la percepción del entorno y de la anticipación que da la distancia de seguridad. Si esta distancia es insuficiente, Frenar se activa tarde y su salida puede no evitar la colisión.

Los modelos distorsionados muestran cómo funciones rutinarias como la percepción del entorno, la reacción del conductor, el respeto de señales de tránsito, el frenado y la gestión de la velocidad (Ca et al., 2017), al verse alteradas por condiciones externas o por presiones organizacionales, generan resonancias funcionales que incrementan la probabilidad de accidente. Así, tanto en la maniobra de adelantar cerrando como en la de no mantener la distancia de seguridad (Donnell et al., 2025), el siniestro surge de la amplificación de pequeñas desviaciones que, al coincidir, derivan en una pérdida del control situacional y en la materialización del riesgo vial (Ma et al., 2024).

4.3 Ejemplo aplicado análisis de accidentalidad

Elementos del modelo se usaron:

- Conducción del vehículo → Vehículo en tránsito, Acelerar, Mantener velocidad de crucero, Cambio de marcha, Frenar.
- Gestión semafórica → Identificación de señal de tránsito, Ejecución de maniobra conforme a la señal, Respeto de señales de tránsito.
- Cruce peatonal → Interacción del conductor con el entorno vial, visualización de espejos y entorno, tiempo de visualización del entorno.
- Control vial → Control en funciones apoyadas en Respetar señales y Aplicar distancia de seguridad.
- Condiciones ambientales → Estado de la vía, Tiempo de visualización del entorno, Evaluación de congestión de la vía.
- Mantenimiento vial → Identificación de señal de tránsito (legibilidad), Estado de la vía (adherencia), Inspección pre/post-viaje (condición mecánica).

Escenario concreto: Hipótesis «no mantener distancia de seguridad» aplicada en intersección

Situación: intersección urbana en tramo con alta mezcla modal (buses, camiones de reparto, motos, peatones). Es horario de alta logística (mañana). Un camión de carga circula a velocidad de crucero; unos segundos

antes, el semáforo del cruce cambia rápidamente (verde → ámbar → rojo) por ajuste de gestión. Un peatón decide cruzar entre columnas (fuera del paso marcado). Hay lluvia ligera y la calzada está resbaladiza.

Variables distorsionadas desde tu modelo:

- Aplicar distancia de seguridad: control debilitado (conductores reducen el gap para adelantar o por congestión).
- Tiempo de reacción del conductor: incrementado (fatiga + distracción).
- Tiempo de visualización del entorno: reducido (lluvia + puntos ciegos por tamaño del camión).
- Estado de la vía: adherencia reducida (lluvia).
- Identificación de señal de tránsito: cambio de semáforo rápido (gestión semafórica variable).
- Acción de agente externo: peatón cruza imprevisto.

Cadena de resonancia funcional (paso a paso)

- Base: El camión mantiene una velocidad estable (Mantener velocidad de crucero) con distancia insuficiente respecto al vehículo que le precede (por aplicar distancia de seguridad con control = ninguno).
- Desencadenante 1: El semáforo cambia rápido; el vehículo líder (auto liviano) frena bruscamente ante la luz roja (Frenar se activa).
- Desencadenante 2: Paralelamente, un peatón cruza fuera de zona; obliga a maniobra evasiva en la parcela de la intersección (Interacción del conductor con el entorno vial y Visualización del entorno).
- Amplificación: La lluvia reduce la adherencia (Estado de la vía), aumentando la distancia de frenado requerida; al mismo tiempo, el tiempo de reacción del conductor del camión está elevado por la carga de trabajo.
- Resultado: Frenar del camión se activa tarde; debido a un gap insuficiente, la salida de Frenar no alcanza a evitar el impacto por alcance con el vehículo que frena o la colisión lateral al intentar esquivar al peatón.
- Resonancia: Las funciones de control (señalización, control policial, distancia mínima) no amortiguan la variabilidad; la interacción entre semáforo, peatón, humedad y gap insuficiente produce la falla sistemática (accidente).

¿Qué conexiones en el modelo son críticas para este escenario?

(énfasis en Acelerar ↔ Frenar y funciones auxiliares)

Aplicar distancia de seguridad → Frenar: si la salida de Aplicar distancia (mantener gap) es débil, la entrada para Frenar queda comprometida — frenado llega demasiado tarde.

Identificación de señal de tránsito → Frenar / Ejecución conforme a señal: semáforo que varía rápido introduce incertidumbre en la decisión de frenar; si la identificación es tardía, la transición a frenar no es previa.

Visualización del entorno → Frenar / Maniobra defensiva: mala visibilidad por lluvia o tamaño del vehículo bloquea la detección temprana del peatón o de frenos del vehículo líder.

Estado de la vía → Frenar: reduce la eficacia de la salida de Frenar (mayor distancia de detención).

Control policial/cámaras → Aplicar distancia / Respetar señales: Este incumplimiento no siempre es por desconocimiento, sino porque los conductores perciben que no hay consecuencias inmediatas

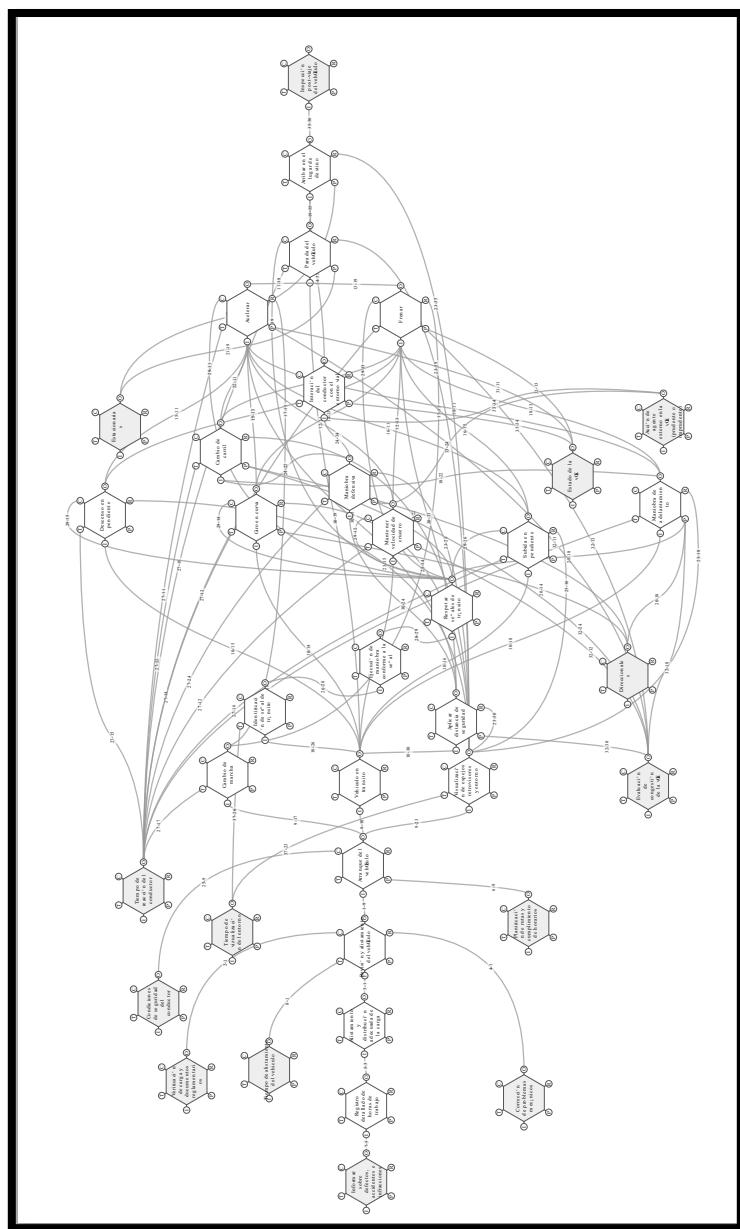
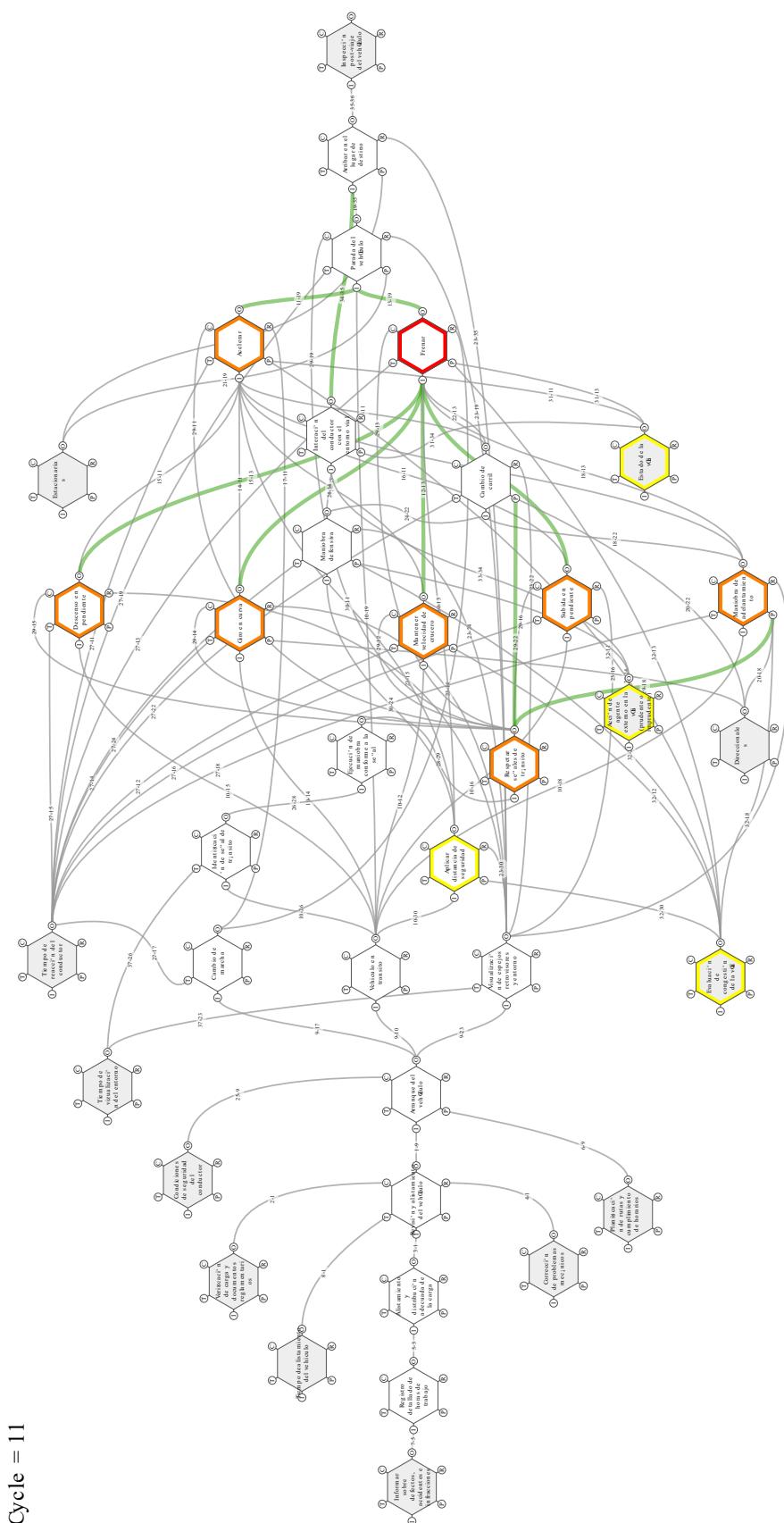


Imagen 5. Modelo ideal conducción camión de carga (FRAM (2012)). Software: functionalresonance.github.io - Elaboración: Propia

Hipótesis no mantener distancia de seguridad.

El modelo ideal construido permitió representar la secuencia funcional que debería garantizar una conducción segura, desde el alistamiento del vehículo y la verificación de documentos y carga hasta la fase de circulación y llegada al destino. En este esquema se incluyeron funciones críticas como acelerar, frenar, mantener velocidad de crucero, cambio de carril, visualización de espejos y entorno (Frančák et al., 2020), respeto de señales de tránsito y aplicación de la distancia de seguridad. Dicho modelo estableció un punto de referencia para el análisis de desviaciones en condiciones reales de operación (Orellana Uribe, 2009).

A partir de este modelo, se aplicó una distorsión orientada a la hipótesis de siniestro “no mantener la distancia de seguridad”, con el fin de identificar cómo pequeñas variaciones funcionales pueden amplificarse hasta generar un accidente.



Software: functionalresonance.github.io - Elaboración: Propia

Imagen 4. Modelo FRAM (2012) distorsionado hacia la hipótesis de No mantener distancia de seguridad.

Los resultados muestran que la pérdida de la distancia de seguridad no surge de un solo error, sino de la convergencia de múltiples interacciones:

Factores humanos: Disminución del tiempo de reacción del conductor, fallos en la percepción del entorno y omisión de señales preventivas (Baudains & Holliman, 2025).

Factores técnicos: Desempeño insuficiente en la función de frenado o aceleración, especialmente en contextos de tránsito denso.

Factores organizacionales: Presión por cumplir horarios que lleva a mantener velocidades superiores a las recomendadas.

Factores ambientales: Congestión, condiciones adversas de la vía o comportamientos imprevisibles de otros actores viales.

El método de resonancia funcional (FRAM) (2012) permitió evidenciar que estas distorsiones se potencian entre sí. Por ejemplo, un tiempo de reacción reducido, sumado a la congestión de la vía y a un frenado menos efectivo, disminuye el margen para aplicar la distancia de seguridad, aumentando así la probabilidad de colisión.

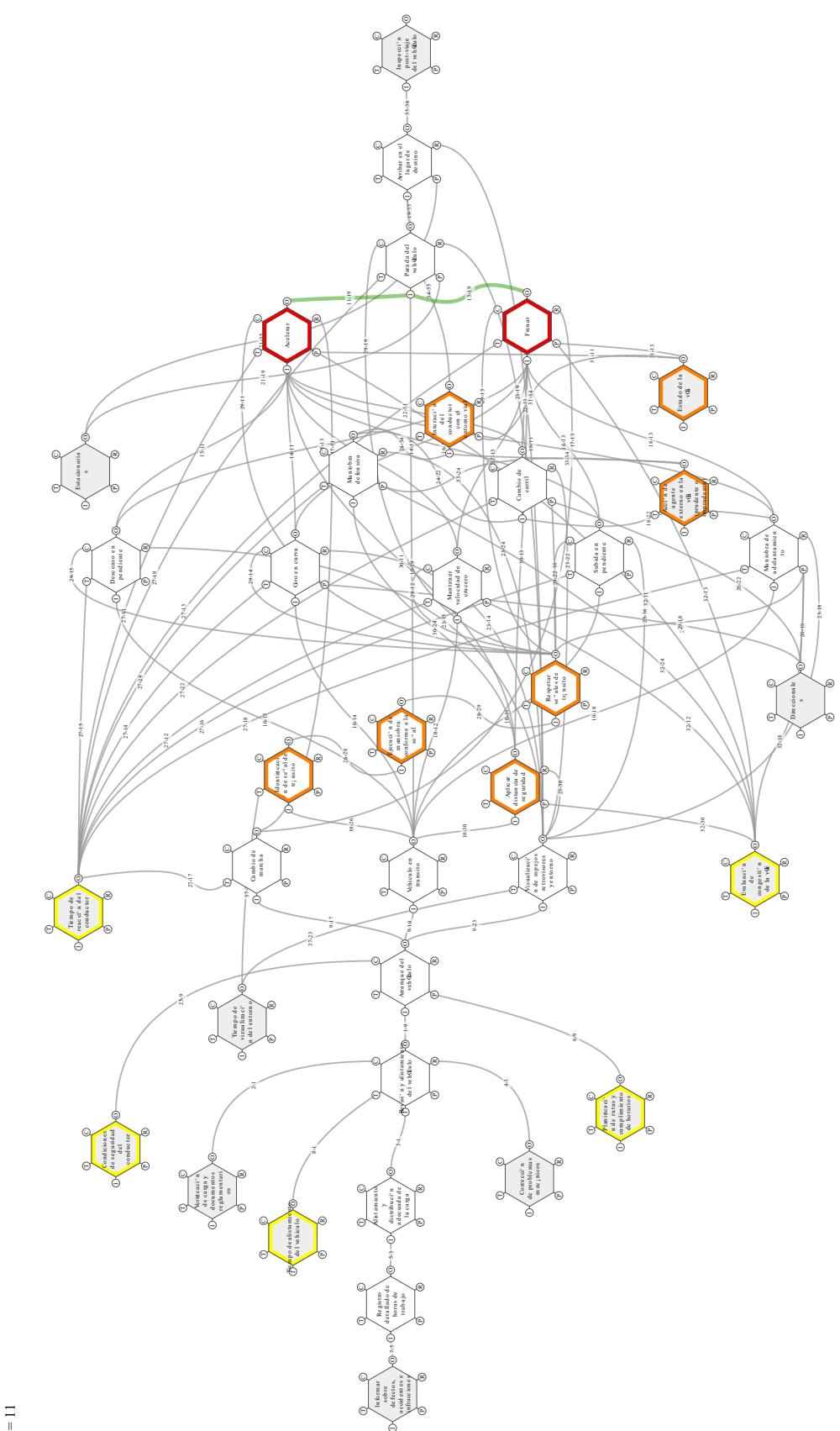
La comparación entre el modelo ideal y la distorsión aplicada confirma que el siniestro asociado a no mantener la distancia de seguridad responde a una resonancia funcional, en la que pequeñas variaciones en funciones cotidianas terminan amplificándose y materializándose en un accidente. Este resultado demuestra la utilidad del FRAM (2012) como herramienta de análisis, al ofrecer una visión más amplia y realista de la causalidad múltiple en los siniestros viales, superando la visión simplificada de los modelos de causa y efecto tradicionales.

Hipótesis adelantar cerrando.

El análisis realizado a través del método de resonancia funcional FRAM (2012) permitió evidenciar que la maniobra de “adelantamiento cerrando” no puede explicarse de manera lineal, sino que resulta de la interacción entre múltiples funciones operativas y condiciones externas. En primer lugar, se identificaron funciones prerequisito al arranque del vehículo, asociadas al alistamiento del vehículo, la planificación de rutas, el estado mecánico y la verificación de la carga, que establecen las condiciones iniciales de seguridad. Variaciones en estas funciones, como fallas en la distribución de la carga o tiempos de alistamiento reducidos, generan distorsiones que afectan la conducción en tránsito (Ruth Welsh & Sourelli, 2021).

Durante la fase de circulación, se destacó la influencia de funciones como acelerar, frenar, mantener velocidad de crucero, cambios de marcha, maniobras defensivas, cambio de carril y visualización del entorno. El modelo muestra que la resonancia funcional se produce cuando pequeñas desviaciones en estas funciones coinciden, lo que aumenta la probabilidad de ejecutar un adelantamiento sin la distancia de seguridad requerida. Asimismo, se observó que factores externos como el estado de la vía, la congestión, las acciones de otros actores viales y las condiciones ambientales amplifican los riesgos. Estos elementos, al interactuar con variables humanas como el tiempo de reacción, la identificación de señales de tránsito y la percepción del entorno, generan escenarios en los que el conductor responde de manera inadecuada, propiciando maniobras peligrosas (González Pérez et al., 2011).

Finalmente, el modelo permitió comparar el escenario ideal con la distorsión de funciones durante el adelantamiento cerrando, evidenciando que el evento no surge de una única falla, sino de la convergencia de múltiples interacciones. Este hallazgo resalta la utilidad del método FRAM (2012) para comprender la complejidad de los siniestros de tránsito, pues permite visualizar cómo variaciones cotidianas en funciones normales pueden amplificarse hasta derivar en un accidente.



Software: functionalresonance.github.io - Elaboración: Propia
Imagen 5. Modelo FRAM (2012) distorsionado hacia la hipótesis de adelantar cerrando.

Los resultados del análisis con el método de resonancia funcional (FRAM) (2012) evidencian que las maniobras de adelantar cerrando y no mantener la distancia de seguridad son producto de la interacción de múltiples factores y no de un error aislado. Esta visión sistémica permite reconocer que la prevención de siniestros viales debe trascender el enfoque punitivo o individual y orientarse hacia estrategias integrales de gestión del riesgo.

En términos aplicados, los hallazgos sugieren la necesidad de:

1. **Fortalecer los programas de capacitación a conductores.** El análisis mostró que en ambas hipótesis (adelantar cerrando y no mantener la distancia de seguridad) la decisión del conductor y su capacidad de reacción son determinantes. Una capacitación basada únicamente en normatividad resulta insuficiente frente a la complejidad real del tránsito. Por ello, se requiere diseñar programas de formación continua que incorporen simulaciones de riesgo, análisis de maniobras críticas y prácticas en condiciones controladas. Desde la dimensión social, este tipo de formación impacta en la reducción de muertes y lesiones graves, lo que a su vez disminuye los costos en atención hospitalaria y rehabilitación. Económicamente, reduce las pérdidas derivadas de la interrupción de actividades laborales por incapacidad, así como los costos de indemnizaciones y seguros (Kaya & Turan, 2025).
2. **Optimizar las condiciones técnicas de los vehículos.** Los resultados destacan que, durante una maniobra riesgosa, la capacidad de respuesta del vehículo (frenado, aceleración, estabilidad en curva, sistemas de señalización) define si un incidente puede evitarse o no (Gao et al., 2022). Un vehículo con mantenimiento deficiente amplifica las distorsiones funcionales detectadas por el FRAM (2012). Por ello, es prioritario fortalecer los programas de revisión técnico-mecánica, incorporar tecnologías de asistencia a la conducción (ADAS) y garantizar la trazabilidad de las reparaciones. En el ámbito social, estas medidas contribuyen a proteger la vida de conductores, pasajeros y peatones. En el plano económico, una flota vehicular segura minimiza los costos asociados a reparaciones tras un siniestro, pérdidas logísticas por interrupciones y sanciones legales por incumplimiento de normas de seguridad vial. (Angarita Martinez & Forero Lancheros, 2023)
3. **Diseñar políticas organizacionales realistas.** Se identificó que la presión por cumplir tiempos estrictos de entrega y metas de productividad genera condiciones que favorecen la toma de decisiones inseguras, como reducir la distancia de seguridad o adelantar en espacios limitados. Reformular estas políticas implica crear esquemas de operación más flexibles, donde prime la seguridad sobre la rapidez. Esto incluye establecer protocolos de descanso adecuados, asignación razonable de cargas laborales y monitoreo de la fatiga del conductor. Socialmente, estas acciones fortalecen el bienestar de los trabajadores del transporte, reducen el estrés laboral y mejoran la percepción de seguridad en la ciudadanía. En el ámbito económico, evitan pérdidas millonarias derivadas de accidentes que interrumpen cadenas logísticas, además de mejorar la reputación empresarial al promover un compromiso con la seguridad vial. (Austers & Muzikante, 2025)
4. **Mejorar la infraestructura y el control vial.** El modelo distorsionado mostró que factores externos como el estado de la vía, la congestión y la conducta de otros actores viales influyen directamente en la ocurrencia de siniestros. Por ello, resulta indispensable fortalecer la señalización preventiva, intervenir tramos críticos con alto índice de accidentalidad y ampliar la cobertura de sistemas de monitoreo y control inteligente del tráfico (Duran & Turan, 2022). Además, el rol de la autoridad debe migrar de lo estrictamente sancionatorio hacia un enfoque preventivo y pedagógico. En el plano social, una infraestructura vial adecuada disminuye la exposición de comunidades enteras a riesgos viales, lo que se traduce en menos víctimas fatales y mayor confianza ciudadana en la movilidad. Económicamente, invertir en infraestructura y control inteligente reduce los costos derivados de accidentes (salud, daños materiales, pérdida de productividad) y optimiza los tiempos de transporte, generando beneficios directos para la competitividad de las ciudades.

De esta manera, el FRAM (2012) no solo se configura como una herramienta de análisis, sino también como un instrumento de apoyo a la toma de decisiones en movilidad segura, al permitir identificar dónde y cómo intervenir para reducir la probabilidad de que determinadas maniobras deriven en siniestros viales. Esta capacidad se potencia al integrar la información recolectada en bases de datos históricas. En este estudio, se utilizó la información suministrada por la Secretaría de Movilidad correspondiente a los últimos cinco años, lo que permitió contar con un panorama estadístico y contextual de los incidentes de tránsito más recurrentes en la ciudad.

El análisis de esta base histórica permitió identificar las hipótesis de accidentalidad más frecuentes, entre las cuales destacan las maniobras de adelantar cerrando y no mantener la distancia de seguridad (Bhavsar et al., 2025). Estas hipótesis no solo fueron seleccionadas por su frecuencia en los registros, sino también por su impacto en términos de siniestralidad vial y las consecuencias sociales y económicas asociadas. De esta forma, la integración

de datos empíricos con un modelo sistémico como el método de resonancia funcional (FRAM) (2012) permitió pasar de un análisis descriptivo de la accidentalidad a un enfoque explicativo de la dinámica que la genera.

El FRAM (2012) hizo posible mapear las funciones involucradas en cada hipótesis y observar cómo, a partir de pequeñas variaciones en funciones rutinarias como el tiempo de reacción del conductor, el respeto de la señalización o la aplicación de la distancia de seguridad, se desencadenan resonancias funcionales que incrementan el riesgo de accidente. De esta manera, la metodología permitió traducir la información estadística en conocimiento aplicable para la gestión de la movilidad, al identificar no solo los eventos más comunes, sino también las interacciones críticas que los originan (Serrano Cruz, 2021).

En consecuencia, el valor agregado del enfoque radica en su capacidad de transformar los registros históricos de accidentalidad en insumos estratégicos para la toma de decisiones, orientando a las autoridades y organizaciones de transporte hacia intervenciones más focalizadas, efectivas y preventivas.

Conclusión

El presente estudio, basado en la aplicación del método FRAM (2012) y en la utilización de la base histórica de siniestros de la Secretaría de Movilidad de los últimos cinco años, permitió identificar y analizar en profundidad dos hipótesis de accidentalidad de alta recurrencia: adelantar cerrando y no mantener la distancia de seguridad. Los resultados evidencian que ambas maniobras no responden a fallas aisladas, sino a la convergencia de múltiples factores humanos, técnicos, organizacionales y ambientales que, al interactuar, generan resonancias funcionales capaces de desencadenar un siniestro vial.

Entre los principales hallazgos se destacan: (I) la importancia del tiempo de reacción del conductor y de la adecuada percepción del entorno como variables críticas en la ocurrencia de incidentes; (II) la influencia del estado técnico del vehículo y de la infraestructura vial en la amplificación de riesgos; (III) la incidencia de factores organizacionales, como la presión por cumplir horarios, que inducen a decisiones inseguras; y (IV) la constatación de que las maniobras analizadas se originan en pequeñas desviaciones de funciones rutinarias que, al coincidir, aumentan exponencialmente la probabilidad de accidente.

Estos resultados tienen implicaciones significativas, dado que ponen en evidencia la necesidad de abordar la seguridad vial desde un enfoque sistémico y de gestión integral de riesgos. La investigación demuestra que herramientas como el método de resonancia funcional (FRAM) (2012) no solo permiten analizar la causalidad múltiple de los siniestros, sino que también sirven como base para diseñar políticas organizacionales más seguras, optimizar procesos logísticos de transporte, orientar la capacitación de conductores y definir estrategias preventivas con impacto directo en la reducción de costos sociales y económicos asociados a la accidentalidad.

No obstante, el estudio presenta ciertas limitaciones. En primer lugar, se centró únicamente en dos hipótesis de accidentalidad, por lo que no abarca toda la variedad de siniestros reportados en la base de datos. En segundo lugar, el análisis se desarrolló a partir de información histórica, lo cual puede limitar la capacidad de capturar dinámicas emergentes del sistema de transporte urbano. Finalmente, no se incorporaron simulaciones empíricas que validaran en tiempo real las distorsiones modeladas.

Estas limitaciones abren oportunidades para futuras investigaciones, tales como: ampliar el espectro de hipótesis analizadas; integrar el método método de resonancia funcional (FRAM) (2012) con técnicas de simulación dinámica o modelado computacional para validar escenarios en tiempo real; y explorar cómo la incorporación de nuevas tecnologías (sensores inteligentes, big data, inteligencia artificial) puede enriquecer el análisis de resonancias funcionales y la predicción de riesgos viales.

En conclusión, este estudio aporta evidencia de que el método de resonancia funcional (FRAM) (2012) constituye una herramienta robusta y eficaz para comprender la complejidad de los siniestros de tránsito y orientar decisiones estratégicas en movilidad segura. Al transformar datos históricos en conocimiento aplicable, la investigación demuestra que es posible diseñar intervenciones preventivas más focalizadas y efectivas. De esta forma, se reafirma que la ingeniería industrial, con su capacidad de análisis sistémico y optimización de procesos, desempeña un rol clave en la construcción de sistemas de transporte más seguros, sostenibles y resilientes.

Referencias

- Alcaldía, Secretaría Distrital de Movilidad. (2020). *Informe de tránsito y transporte en Bogotá*. Secretaría distrital de movilidad. <https://bogota.gov.co/servicios/entidad/secretaria-distrital-de-movilidad-sdm>
- Alfonso Wilches, J. A., Ávila Forigua, A. F., & Gómez Cifuentes, J. N. (2023). *ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN A LA ACCIDENTALIDAD VIAL EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL PUENTE DE CALLE 136 Y CALLE 170 - AUTOPISTA NORTE BOGOTÁ*. Universidad la Gran Colombia .

- Amini, I., Boroujerdian, A. M., & Karimi, A. (2021). Risk evaluation of multiple passing maneuvers on two-lane rural highways in Iran. *Accident Analysis & Prevention*, 163(106472), 106472. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2021.106472>
- Angarita Martinez, D. M., & Forero Lancheros, D. A. (2023). *Las buenas prácticas en la implementación del SG-SST para la reducción de accidentalidad vial para los trabajadores conductores de carga en Colombia*. Universidad Libre de Colombia. <https://doi.org/hdl.handle.net/10901/28180>
- Arshad, A. K., Hamidun, R., Haron, S., Hashim, W., & Zainuddin, N. I. (2023). Influence of road and environmental factors towards heavy-goods vehicle fatal crashes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.pce.2022.103342>
- Austers, I., & Muzikante, I. (2025). Situational reflection as predictor of safe driving: Development and testing of the Driver Situational Reflection Scale (DSRS). *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 32(101503). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.trip.2025.101503>
- Baudains, P., & Holliman, N. S. (2025). Visual summaries of traffic congestion with uncertainty: Exploring street network distances and vehicle orientation. *Computers & Graphics*, 129, 104228, 129. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.cag.2025.104228>
- Bekhor, S., Farah, H., & Polus, A. (2009). Risk assessment of overtaking maneuvers involving heavy goods vehicles on two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 41(4), 887-894. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2009.05.006>
- Bella, F., Gagli, V., & Gulisano, F. (2024). Safety analysis of motorcyclists' overtaking maneuvers. *Accident Analysis & Prevention*, 208(107809). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2024.107809>
- Bhavsar, Y. M., Raval, M. S., Zaveri, S. B., & Zaveri, M. S. (2025). Evaluating defensive driving behaviour based on safe distance between vehicles: A case study using computer vision on UAV videos at urban roundabout. *Multimodal Transportation*, 4(3). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.multra.2025.100227>
- Brito Lopes, A. V., Duarte Soliani, R., Emekwuru, N., Santiago, F., & Tiradentes Terra Argoud, A. R. (2024). Catastrophic causes of truck drivers' crashes on Brazilian highways: Mixed method analyses and crash prediction using machine learning. *Multimodal Transportation*, 3(4). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.multra.2024.100173>
- Ca, J., Jagelcak, J., Vrabel, J., & Zamecnik, J. (2017). Influence of Emergency Braking on Changes of the Axle Load of Vehicles Transporting Solid Bulk Substrates. *Procedia Engineering*, 187, 89-99. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.354>
- Cabralles, S., Carvajal, G. A., López, S., Medaglia, A. L., Quistberg, D. A., Rodríguez, D. A., & Sarmiento, O. L. (2020). Bicycle safety in Bogotá: A seven-year analysis of bicyclists' collisions and fatalities. *Accident Analysis & Prevention*, 144(105596), 5-10. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2020.105596>
- Cantisani, G., Del Serrone, G., Mauro, R., & Pompigna, A. (2025). Modeling Intervehicle Spacing for Safe and Sustainable Operations on Two-Lane Roads. *Sustainability*, 8(3602), 17. <https://doi.org/doi.org/10.3390/su17083602>
- Castro, C., Dinu, A. I., Doncel, P., Laffarga, L., Salazar Frías, D. A., Szot, A. C., & Rodríguez Bailón, M. (2024). *ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS CONDICIONES PSICOFÍSICAS SOBRE LA SEGURIDAD VIAL*. UNIVERSIDAD DE GRANADA.
- Chen, M., Li, M., Jiang, Y., Pang, B., Wang, S., & Yang, L. (2025). Effects of braking conditions on the dynamic responses of multi-axle heavy-duty vehicles coupled with pavement roughness and flexibility. *Defence Technology*, 52, 274-294. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.dt.2025.06.014>
- Chen, S., Fu, Y., Guo, Y., Ma, Y., Sayed, T., & Zhang, C. (2024). Exploring the impact of right-turn safety measures on E-bike-heavy vehicle conflicts at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 206(107722). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2024.107722>
- Chen, S.-Y., Sasidharan, L., Thor, C. P., & Wu, K.-F. (2018). Crash sequence based risk matrix for motorcycle crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 117, 21-31. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2018.03.022>
- Corabastos. (Julio de 2025). *Con más de 247 mil toneladas, Corabastos vivió uno de los meses de mayor oferta de alimentos en 2025*. Corabastos. <https://corabastos.com.co/con-mas-de-247-mil-toneladas-corabastos-vivio-uno-de-los-meses-de-mayor-oferta-de-alimentos-en-2025/>
- Donnell, E. T., Gayah, V. V., & Poudel, P. (2025). Safety performance of passing zone segments on two-lane rural highways in Pennsylvania: Comparing crash modification factors from causal inference and unobserved heterogeneity models. *Accident Analysis & Prevention*, 220. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.aap.2025.108165>
- Duran, O., & Turan, B. (2022). Vehicle-to-vehicle distance estimation using artificial neural network and a toe-in-style stereo camera. *Measurement*, 190. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110732>

- Frančák, M., Jagelčák, J., Marienka, P., & Synák, F. (2020). Comparison of Braking Characteristics of Solo Vehicle and Selected Types of Vehicle Combinations. *Transportation Research Procedia*, 44, 40-46. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.007>
- Fu, S., & Wu, X. (2023). Research on Safe Following Distance on an Expressway Based on Braking Process Analysis. *Transportation and Future Mobility*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/app13021110>
- Gao, C., Sol, Z., Xu, J., & Xin, T. (2022). Study on the Maximum Safe Instantaneous Input of the Steering Wheel against Rollover for Trucks on Horizontal Curves. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph19042025>
- González Pérez, R. E., Noreña Aristizábal, O. P., & Pico Merchán, M. E. (2011). SEGURIDAD VIAL Y PEATONAL: UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA DESDE LA POLÍTICA PÚBLICA. *Hacia la Promoción de la Salud*, 16(2), 190-204. <https://doi.org/10.17533/udea.hps.v16n2a14>
- Granados León, E. L., Moreno Rodríguez, J., Norza Céspedes, E. H., Romero Hernández, M., & Useche Hernández, S. A. (2014). Componentes descriptivos y explicativos de la accidentalidad vial en Colombia: incidencia del factor humano. *Revista Criminalidad*, 56(1), 157-187. <https://doi.org/doi.org/10.22517/25395203.25144>
- Guzmán Peña, C. A. (2025). *Caracterización de siniestralidad de camiones en la calle 13*. Bogotá: Secretaría de Movilidad.
- Himmels, C., Löcken, A., Parduzi, A., Protschky, V., Riener, A., & Venrooij, J. (2024). Validating risk behavior in driving simulation using naturalistic driving data. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 107(1369-8478), 710-725. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.trf.2024.09.026>
- Hollnagel, E. (2012). *The Functional Resonance Analysis Method*. Ashgate Publishing Limited.
- Hou, Z., Keung, K., Lee, C., & Lv, Y. (2023). Fault detection and diagnosis of air brake system: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 71, 34-58. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.005>
- Jarrín Quint, J. A., Rodríguez Gómez, W. F., & Solano Charris, E. L. (2021). CORREDOR LOGÍSTICO DE LA CALLE 13: HALLAZGOS Y RECOMENDACIONES. Universidad de la Sabana.
- Jeppsson, H., & Schindler, R. (2024). In-depth analysis of scenarios and injuries in crashes between cyclists and commercial vehicles in Germany. *Investigación sobre seguridad vial* 7:e000067, 7(67). <https://doi.org/10.55329/uoc5084>
- Jurecki, R. S., & Poliak, M. (2023). The Impact of the Safe following Distance onto the Traffic Safety. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 26(5), 37-49. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.014>
- Kaya, M., & Turan, B. (2025). Machine-learning-based ensemble regression for vehicle-to-vehicle distance estimation using a toe-in style stereo camera. 240. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115540>
- King, M. J., Lacherez, P. F., Marszalek, R. P., & Wood, J. M. (2009). Drivers' and cyclists' experiences of sharing the road: Incidents, attitudes and perceptions of visibility. *Accident Analysis & Prevention*, 41, 772-776. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.03.014>
- León González, M. (2024). *Tiempo de reacción motora frente a estímulos visuales*. Universidad de Valladolid.
- Li, P., Li, Y., Liu, Y., Luo, Y., Wang, L., Zhang, S., & Zhou, X. (2023). Study of instability mechanisms of trucks turning right at long downhill T-junctions based on Trucksim simulation. *PLoS One*, 18(3). <https://doi.org/doi.org/10.1371/journal.pone.0282779>
- Lißner, S., & Reh, J. (2023). Pathways to more space. What factors influence the lateral distance of overtaking vehicles from cyclists? *Transportation Research Procedia*, 72, 3585-3592. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.734>
- Ma, L., Ou, Y., Pu, X., Yang, D., Zhang, M., & Zhong, W. (2024). Research on friction and wear properties of new energy micro logistics vans brake materials under different ambient temperature and humidity conditions. *Wear*, 556-557. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.wear.2024.205511>
- Marisamynathan, S., & Shandhana Rashmi, B. (2024). An investigation of relationships between aberrant driving behavior and crash risk among long-haul truck drivers traveling across India: A Structural Equation Modeling approach. *Journal of Transport & Health*, 38(101871). <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jth.2024.101871>
- Montoya Valero, L. (2017). *Aplicación del método FRAM al análisis de accidentes en la industria de procesos*. Biblioteca ETSI Industriales (UPM).
- Orellana Uribe, A. (2009). *Valoración del tiempo de reacción simple y discriminativo como determinante de la respuesta neuromotriz*. Universidad de Granada.
- Palacio, K. (1 de Julio de 2024). *Hipótesis de accidentes de tránsito*. NBI S.A.S. <https://nbi.com.co/accidentes-de-transito-hipotesis-de-accidentes-fallas/>
- Ruth Welsh, P. T., & Sourelli, A.-M. (2021). Objective and perceived risk in overtaking: The impact of driving context. *Transportation Research Part F*, 81, 190-200, 81(1369-8478), 190-200. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.trf.2021.05.018>

Serrano Cruz, K. D. (2021). *Diseño de un dispositivo sensorial para reducir el tiempo de reacción ante*. Universidad Autónoma de Querétaro.

software, hse. (Febrero de 2021). *Modelo de Accidente de Resonancia Funcional (FRAM)*. hse.software. <https://hse.software/2021/02/03/modelo-de-accidente-de-resonancia-funcional-FRAM/>