



Scientia Et Technica

ISSN: 0122-1701

scientia@utp.edu.co

Universidad Tecnológica de Pereira  
Colombia

Duarte Forero, Edgar Leonardo; Camacho Oliveros, Manuel Ángel; Meneses Velosa, Sonia  
Exploración de relaciones causales entre accidentalidad vial  
y productividad empresarial usando dinámica de sistemas  
Scientia Et Technica, vol. 23, núm. 2, 2018, Marzo-Junio, pp. 204-213  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Pereira, Colombia

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84958010010>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

# Exploración de relaciones causales entre accidentalidad vial y productividad empresarial usando dinámica de sistemas

Exploring relations between traffic accidents and business productivity using system dynamics

Edgar Leonardo Duarte Forero, Manuel Ángel Camacho Oliveros, Sonia Meneses Velosa

*Ingeniería industrial, Universidad Libre, Bogotá, Colombia*

[edgarl.duarte@unilibre.edu.co](mailto:edgarl.duarte@unilibre.edu.co)

[manuel.camachoo@unilibre.edu.co](mailto:manuel.camachoo@unilibre.edu.co)

[sonial.menesesv@unilibre.edu.co](mailto:sonial.menesesv@unilibre.edu.co)

**Resumen**—La accidentalidad vial se ha estudiado como un fenómeno que involucra tres factores principales: comportamiento de conductores, parque automotor y malla vial. El artículo explora factores causales adicionales, y para ello aborda las relaciones que existen entre la productividad empresarial y la accidentalidad vial, a la luz de la incidencia de las autoridades gubernamentales. Se construyó un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas que permite estudiar el comportamiento de los conductores, la presión laboral a la cual son sometidos y los controles de las autoridades viales. El análisis permitió establecer que la mezcla de controles más intensos, pero menos frecuentes, y mayor productividad en las operaciones de transporte son una estrategia apropiada para regular la accidentalidad. El modelo es una herramienta para el diseño de políticas públicas y toma de decisiones en materia de seguridad vial.

**Palabras clave**—Accidentalidad vial, Dinámica de sistemas, política pública, seguridad vial.

**Abstract** — Traffic accidents are commonly analyzed considering three main factors: driver's behavior, car's conditions, and the roads conditions. An exploration of the relations among business productivity and traffic accidents is made, considering also the influence of traffic authorities. A simulation model based on System dynamics was developed to explore the specific relations among the behavior of drivers and the working pressure of their jobs, and the traffic controls made by government authorities. The analysis considers that an improvement in productivity and a fewer, but more intense traffic controls, is a valid strategy to reduce accidents in roads. The model is a useful tool that can be applied in the design of public policies for road safety.

**Keywords** —Public policy, System Dynamics, traffic accidents, traffic safety.

## I. INTRODUCCIÓN

La accidentalidad vial es uno de los problemas más graves que afrontan las grandes urbes. Cada año mueren cerca de 1.3 millones de personas en las carreteras del mundo por accidentes viales [1]. En América Latina el problema no es menor, más de 150 mil personas mueren al año en esta región por accidentes de tránsito, constituyendo un 12% de las muertes ocasionadas a escala mundial por esta razón [2, p. 3]. El aumento de la motorización, la calidad de la infraestructura vial y la brecha entre la legislación y su aplicación, son considerados como factores atenuantes de este fenómeno.

En Colombia, la caracterización de la accidentalidad vial ha sido abordada tanto por actores gubernamentales como por la academia [3], [4]. Sus resultados evidencian la necesidad de contar con mejores políticas acerca de la medición, seguimiento y prevención de accidentes, contribuyendo así a su análisis como un problema de salud pública [5]. Una de las características transversales en los estudios sobre accidentalidad vial consiste en las dificultades metodológicas para analizar cuantitativamente el fenómeno.

El análisis de la accidentalidad implica estudiar tres factores planteados por Haddon [6]: comportamiento de los conductores, estado de los vehículos y condiciones de la malla vial. El modelo de Haddon ha sido utilizado por diferentes autores para aplicaciones de casos agregando otras dimensiones complementarias tales como: legislación inapropiada, hábitos de consumo del conductor y el diseño del vehículo [7]–[10]. La intervención de los actores gubernamentales sobre los factores propuestos por Haddon no debe realizarse de manera aislada, sino armónica, de manera que sea posible plantear estrategias que agrupen a varios factores al mismo tiempo, como lo recomienda el estudio de Castellanos [11].

El análisis del factor humano como generador de accidentalidad implica considerar los fenómenos de fatiga [12], aprendizaje [13]–[15], y percepción de riesgo [16]. En este sentido se destaca el trabajo de Minami y Madnick [17] quienes analizan la accidentalidad y su incidencia en las operaciones de una institución militar. El estudio del impacto de las condiciones de malla vial en la accidentalidad también ha sido ampliamente documentado por autores como [18] y [19].

Ante la necesidad de enfoques integrales para examinar la problemática de la accidentalidad se han venido desarrollando distintos estudios utilizando la metodología de la dinámica de sistemas [20]–[22]. Se destaca el trabajo de [23] quienes a partir de un estudio de caso en Trujillo (Perú), establecieron como principales causas de los accidentes de tránsito al conductor (64%), su imprudencia (14%), y factores externos (22%). El trabajo de Minami y Madnick, también se basa en la metodología de la dinámica de sistemas [17].

Con respecto a la validez metodológica de la dinámica de sistemas, [22, p. 1600] expone un balance de sus ventajas y desventajas. Si bien destacan su utilidad como herramienta para el diseño de políticas públicas, también señalan la necesidad de explorar estos modelos para mejorar su validez estructural y de comportamiento. [24, p. 248] plantean la necesidad de introducir diversos arquetipos y estructuras ya diseñadas dentro de la dinámica de sistemas en otros escenarios como las cadenas de suministro, la demografía y la productividad empresarial.

En la revisión realizada se destaca la ausencia de estudios acerca de la relación entre la accidentalidad vial, sus causales, y su relación con la productividad de los sectores económicos asociados al transporte.

La motivación de este estudio surge por la necesidad de explorar la influencia del comportamiento del conductor y el entorno económico del sector transportador en la accidentalidad vial. También interesa explorar la reacción de estos subsistemas ante la influencia de los controles policiales. El propósito del presente trabajo consiste en estudiar las relaciones existentes entre estos factores y la accidentalidad vial, de tal manera que se puedan proponer políticas que contribuyan a la reducción de los indicadores de accidentalidad. Los resultados del estudio permiten a los diseñadores y ejecutores de políticas públicas, el análisis del impacto de sus decisiones en materia de accidentalidad vial.

Se pretende responder a las siguientes preguntas: ¿qué estados caracterizan el comportamiento de los conductores con respecto a sus formas de operar?, ¿de qué manera se ven influenciados estos estados por aspectos asociados a la productividad y exigencia laboral en los entornos laborales de las personas?, ¿cómo se relacionan la accidentalidad, la productividad laboral y las políticas de control de tráfico que se ejercen por parte de autoridades del tránsito?

Para ello, se propone la construcción de un modelo de simulación matemático computacional que permita explorar estas relaciones, evaluar escenarios y obtener lineamientos de políticas a implementar.

El artículo se ha estructurado así: en la segunda parte se encontrará la descripción de la metodología utilizada para dar solución a las preguntas, sus técnicas, y planteamiento teórico. En una tercera parte se presentan los resultados de la validación del modelo de simulación construido y el estudio de los resultados de los escenarios y políticas propuestas. Finalmente, la cuarta parte expone los aprendizajes, implicaciones y nuevas inquietudes obtenidas a partir del modelo construido y su análisis a la luz de las preguntas de investigación.

## II. METODOLOGÍA DE ELABORACIÓN

La Dinámica de Sistemas es una metodología para el estudio de sistemas complejos mediante la construcción de modelos de simulación informática computacional que pongan de manifiesto las relaciones entre la estructura del sistema y su comportamiento [25]. El uso de la dinámica de sistemas permite describir, modelar, simular y analizar el comportamiento en el tiempo de sistemas complejos en términos de sus procesos, información, límites organizacionales y estrategias.

La metodología se enfoca en las relaciones y retroalimentaciones que existen entre las variables de un sistema. De esta manera, se logra una visión más holística de los sistemas reales, en contraposición a los tradicionales enfoques lineales causa – efecto. Desde su concepción original, la Dinámica de sistemas ha sido utilizada para analizar situaciones como el efecto látigo en cadenas de suministro, la formulación de políticas ambientales, la gestión organizacional y su relación con el aprendizaje, las políticas públicas y las dinámicas urbanas, entre muchas otras [26, p. 41].

La Dinámica de Sistemas ha sido utilizada como metodología para el análisis de sistemas de transporte y el estudio de la accidentalidad vial [27]. [28] presenta un recorrido sobre los distintos usos de la dinámica de sistemas en transporte identificando tres enfoques: estudios locales, estudios regionales y estudios de política pública. Con respecto al estudio de la accidentalidad vial, son relevantes los estudios de [22], [21], y [17].

La dinámica de sistemas resulta apropiada para estudiar temáticas asociadas al transporte porque permite considerar variables de tipo social y económico, maneja sistemas de gran escala, y tiene una gran facilidad de representación, transferencia y transparencia en el manejo de datos [29].

Normalmente, el uso de la dinámica de sistemas implica cinco pasos metodológicos [26, p. 83]. El primer paso de articulación del problema involucra una descripción cualitativa de los factores que intervienen en el objeto de estudio. En esta etapa se define el objeto de estudio, sus características y los límites del alcance del proceso investigativo. El segundo paso, denominado hipótesis dinámica, implica la construcción de un modelo mental basado en diagramas causales, que permite identificar las relaciones de causalidad y polaridad entre las variables que intervienen en el problema. En la fase de formulación de la simulación, se lleva a cabo la construcción de un modelo matemático computacional, utilizando diagramas de Forrester para examinar el comportamiento dinámico de las medidas de

desempeño [30]. En la fase de validación del modelo, se llevan a cabo pruebas de condiciones extremas, reproducción del comportamiento, y análisis de sensibilidad para examinar la adecuación del modelo al problema bajo análisis. Finalmente, en la etapa de evaluación de políticas, se comprueba el comportamiento de las medidas de desempeño del modelo bajo combinaciones específicas de los parámetros utilizando técnicas de análisis estadístico de la sensibilidad.

#### A. Hipótesis dinámica de la accidentalidad vial

Tras haber presentado la articulación del problema en el apartado I. INTRODUCCIÓN, se procedió a construir un modelo mental del sistema a partir de un diagrama causal que permita comprender las relaciones de causa, efecto y retroalimentación existentes. A tal efecto, se define inicialmente el sistema como el conjunto de variables que están involucradas de manera directa con la accidentalidad vial, el comportamiento característico de los conductores, los factores de productividad en la región económica de estudio y las acciones gubernamentales para el control del tráfico.

De acuerdo con Haddon [6] la etiología de la accidentalidad vial puede ser estudiada analizando dimensiones de carácter temporal y causal. Las dimensiones temporales tienen que ver con lo que sucede antes, durante y después del accidente, mientras que las dimensiones causales consideran tres actores fundamentales: comportamiento de los conductores, estado de los vehículos y condiciones de la malla vial. El presente estudio se concentró en el comportamiento de los conductores y en la dimensión temporal asociada a aquello que sucede antes del accidente.

Procediendo con la metodología de Sterman [26], se construyó una hipótesis dinámica que permitiese explicar el fenómeno de la accidentalidad considerando los tres factores establecidos en las preguntas de investigación: formas de conducción, productividad y control de tráfico. La Figura 1 constituye la representación de la hipótesis a partir de un diagrama causal.

Los ciclos B1, B2 y R1 tienen por objeto explicar las formas de conducción de los usuarios del sistema vial. Los conductores pueden permanecer en tres estados distintos de acuerdo con su comportamiento al conducir: conductores responsables, conductores imprudentes y conductores que son susceptibles de ser imprudentes. El ciclo B1 “Generación de imprudencia” permite establecer que, con el paso del tiempo, los conductores susceptibles CS se convierten en conductores imprudentes CI. Esto se ve favorecido por la Presión laboral ejercida para aumentar la imprudencia PL. El ciclo B2 “Aprendizaje” explica la forma en que los conductores imprudentes CI se convierten en responsables CR como producto de la generación de más accidentes NA y por ende una mayor reacción punitiva RP por parte de las autoridades de gobierno. Finalmente, el ciclo R1 “Erosión” representa la forma como los conductores responsables CR vuelven a convertirse en susceptibles CS por la condición degenerativa que tiene el aprendizaje con el paso del tiempo.

Los ciclos B3 y R2 explican la relación entre la productividad laboral y la accidentalidad. En el ciclo B3 “Eficiencia laboral”

se denota la forma como la presión laboral PL incrementa la velocidad promedio y ésta con el tiempo alivia la presión experimentada a través de un mayor cumplimiento laboral CL y la disminución consecuente del trabajo remanente TR.

No obstante, el ciclo R2 “Impacto en la productividad” afecta la situación, pues la mayor presión laboral PL genera más accidentes y ello disminuye la productividad laboral PL. Se genera así una paradoja consistente en que la mayor presión laboral ayuda a ser más eficiente en el corto plazo, pero también aumenta la accidentalidad y por ende disminuye la eficiencia en el mediano y largo plazo.

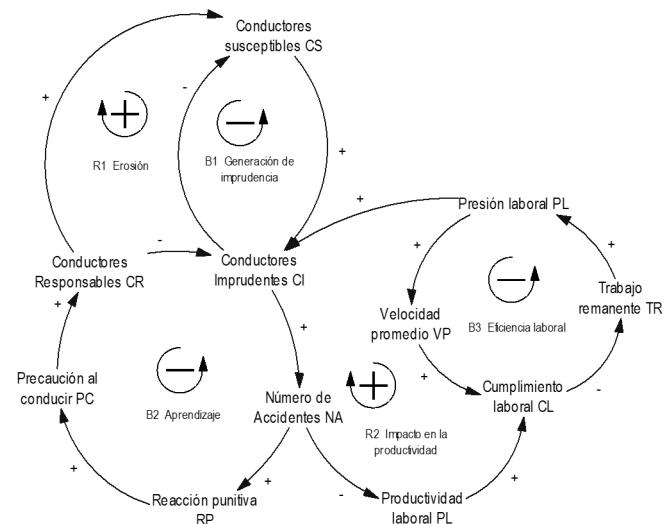


Figura 1. Diagrama Causal de la Accidentalidad Vial

El diagrama construido presenta dos ciclos de refuerzo y tres de balance. Las estrategias para disminuir la accidentalidad le apuntan al aprendizaje, a la eficiencia en los entornos laborales y a las dinámicas poblacionales (relación entre conductores imprudentes y susceptibles). De otro lado, el anhelo constante por una mayor productividad laboral y la disminución paulatina de la percepción del riesgo y degradación de las habilidades al conducir, son los principales aspectos que, en contravía, ayudan a aumentar la accidentalidad.

#### B. Modelo de simulación

Con el fin de examinar el comportamiento dinámico de las variables asociadas en el Diagrama causal de la accidentalidad vial (Figura 1), se construyó un diagrama de flujos y niveles (también llamado diagrama de Forrester) utilizando el aplicativo Vensim DSS en su versión 6.3. Este diagrama permite asignar modelos matemáticos a cada una de las variables examinadas, así como a las relaciones entre ellas.

El modelo construido presenta dos estructuras de flujo. La primera de ellas representa el flujo de conductores dentro del escenario urbano y está constituido por los niveles CS, CI y CR. Esta estructura está basada en los conceptos teóricos planteados en la teoría acerca del modelo SIR para evaluar flujos de poblaciones [26]. La estructura estudia la forma como los individuos de una población pueden pasar de un estado a otro, y en este

caso tales estados consisten en la predisposición hacia cometer infracciones de tránsito: conductores susceptibles, conductores imprudentes y conductores responsables (Ver Figura 2).

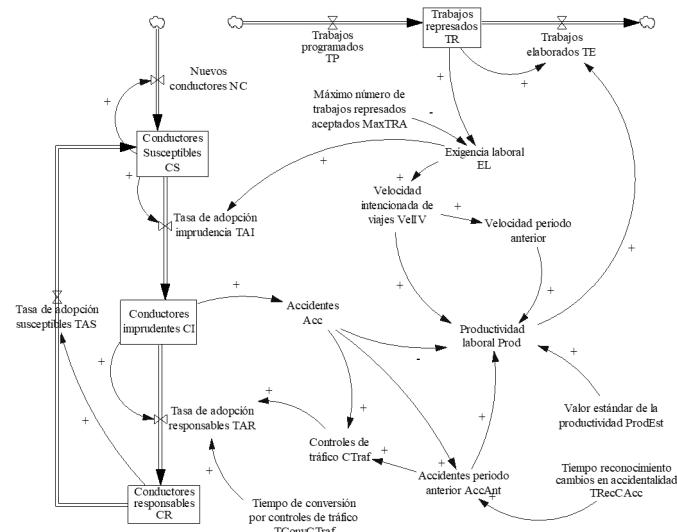


Figura 2. Diagrama de Forrester para la accidentalidad vial

El segundo flujo representa la acumulación de trabajos reprimidos por parte de los sectores económicos que dependen del transporte urbano. En ella se refleja cómo los trabajos programados (TP) se convierten en elaborados (TE), dejando un nivel de trabajos reprimidos (TR) que son los que en últimas van a incidir en la exigencia laboral del mercado. Una alta exigencia laboral (EL) implica por un lado una mayor adopción de imprudencia (TAI) y por el otro una mayor velocidad intencionada de viajes que se traduce en mayor productividad (Prod). De esta manera se denota cómo el crecimiento económico trae consigo aspectos positivos como la mejora en la productividad, pero también otros negativos que atañen al descuido en la conducción (Ver Figura 2).

El modelo también permite examinar la forma como las autoridades gubernamentales inciden en la accidentalidad. La generación de controles de tráfico (Ctraf) por parte de las autoridades viales es la resultante del crecimiento del número de accidentes (Acc y AccAnt). Si las autoridades pueden detectar rápidamente los cambios en la accidentalidad (TRecAcc) significa que los controles de tráfico no estarán tan desfasados frente a cambios en la accidentalidad. Esto se asemeja a las relaciones entre oferta y demanda explicadas en el efecto látigo de las cadenas de suministro.

Finalmente, la tasa de adopción de responsables (TAR) es producto de la relación entre los controles de tráfico y el tiempo de conversión por controles de tráfico (TConvCtraf).

La composición detallada del modelo se puede analizar desde dos puntos de vista: técnico y funcional. Desde el punto de vista técnico, las variables se clasifican en auxiliares, niveles y flujos [31]. Los niveles funcionan como acumuladores de recursos o información. Los flujos permiten aumentar o disminuir el valor de los niveles. Finalmente, las variables auxiliares sirven de apoyo a los cálculos de las dimensiones de los flujos.

Desde el punto de vista funcional, las variables fueron clasificadas en parámetros, medidas de desempeño y variables auxiliares. Los parámetros constituyen valores independientes o exógenos al ámbito del sistema analizado. Su incidencia en el sistema genera cambios en las variables constitutivas y a su vez éstas inciden en las medidas de desempeño, cuya función consiste en permitir interpretar el comportamiento dinámico del sistema. Finalmente, las variables auxiliares permiten enlazar a los parámetros con las medidas de desempeño.

En la siguiente tabla se presenta una completa descripción de las variables del modelo de simulación de acuerdo con la metodología de Rahmandad y Sterman [32] considerando el carácter técnico y funcional de cada componente.

Fórmulas y comentarios	Unidades	Carácter técnico	Carácter dimensional
$CS(t) = CS(0) + \int_0^t (NC(s) + TAS(s) - TAI(s)) ds$ Los conductores susceptibles (CS) se incrementan por los nuevos conductores (NC) y por el flujo de conductores responsables que se convierten en susceptibles (TAS). Se reduce por los conductores susceptibles que se convierten en imprudentes (TAI).	[1]	Personas	Nivel Medida de desempeño
$CI(t) = CI(0) + \int_0^t (TAI(s) - TAR(s)) ds$ Los conductores imprudentes (CI) se afectan por el flujo de nuevos conductores imprudentes (TAI) y por los que pasan de imprudentes a responsables (TAR).	[2]	Personas	Nivel Medida de desempeño
$CR(t) = CR(0) + \int_0^t (TAR(s) - TAS(s)) ds$ El número de conductores responsables (CR) depende del flujo de nuevas personas responsables (TAR) y aquellos que vuelven a ser susceptibles (TAS).	[3]	Personas	Nivel Medida de desempeño
$TAS(t) = (CR(0) * DemS + \int_0^t (CR(s) - TAS(s)) ds) / DemS$	[4]	Personas	Flujo Medida de

Fórmulas y comentarios	Unidades	Carácter técnico	Carácter dimensional
La tasa de adopción de susceptibles (TAS) representa el número de personas que pasan de ser responsables (CR) a ser susceptibles (CS) y se comporta como una demora de primer orden. Se realiza una suavización entre el nivel CR y la tasa TAS.	/ año		desempeño
$TAI(t) = \text{Max}(0, CS^{EL}) * k$	[5]	Personas / año	Flujo
La tasa de adopción de imprudentes (TAI) es el número de personas que pasan de ser susceptibles (CS) a ser imprudentes (CI). Depende de una constante ajustada por calibración (k) y CS elevado a la potencia de la exigencia laboral (EL).			Medida de desempeño
$TAR(t) = CI(t) * CTraf(t) + \int_0^t \frac{CI(s) * CTraf(s) - TAR(s)}{TConvCTraf} ds$	[6]	Personas / año	Flujo
La tasa de adopción de responsables (TAR) es una suavización proporcional al producto de los conductores imprudentes (CI) y el coeficiente de controles de tráfico (CTraf) menos la tasa TAR. Es inversamente proporcional al tiempo de conversión de los conductores debido a los controles de tráfico (TConvCTraf).			Medida de desempeño
$TR(t) = VInTrRep + \int_0^t TP(s) - TE(s) ds$	[7]	Trabajos	Nivel
La cantidad de trabajos represados (TR) se nutre de los trabajos programados (TP) y se ve disminuido por el número de trabajos elaborados (TE). El valor inicial para este nivel corresponde a un parámetro fijado por calibración (VInTrRep).			Medida de desempeño
$TP(t) = VBTR$	[8]	Trabajos / año	Flujo
El flujo de los trabajos programados (TP) está considerado como una constante asociada al parámetro de Valor base de trabajos (VBTR).			Parámetro
$TE(t) = \text{if then else } (TR > 0, TR * Prod, 0)$	[9]	Trabajos / año	Flujo
El flujo de trabajos elaborados (TE) se calcula como el producto de los trabajos represados (TR) por la productividad del sector (Prod).			Medida de desempeño
$EL(t) = TR(t) / \text{MaxTRA}$	[10]	Adimen-sional	Auxiliar
La variable auxiliar Exigencia laboral (EL) es el cociente de los trabajos represados (TR) y del parámetro Máximo número de trabajos represados aceptados (MaxTRA).			Parámetro
$VelIV(t) = EL(t) * P1$	[11]	Adimen-sional	Auxiliar
La variable auxiliar Velocidad intencionada de viajes (VelIV) se calcula como el producto de la exigencia laboral (EL) y un parámetro de conversión (P1).			Auxiliar
$Prod(t) = ProdEst - \frac{Acc(t) - Acc(t-1)}{Acc(t-1)} * PRProdAcc + \frac{VelIV(t) - VelIV(t-1)}{VelIV(t-1)} * PAPProdVel$	[12]	Adimen-sional	Auxiliar
La productividad (Prod) se calcula a partir de un valor estándar (ProdEst) y depende del crecimiento de la accidentalidad (Acc) y la velocidad promedio (VelIV).			Medida de desempeño
$Acc(t) = CI(t) * CoefAcc$	[13]	Acciden-tes por año	Auxiliar
El número de accidentes (Acc) es proporcional al número de conductores imprudentes (CI) y un coeficiente obtenido por calibración (CoefAcc).			Medida de desempeño
$CTraf(t) = \frac{Acc(t) - Acc(t-1)}{Acc(t-1)} + \int_0^t \frac{Acc(s) - Acc(s-1) - CTraf(s)}{m} ds$	[14]	Adimen-sional	Auxiliar
Los controles de tráfico (CTraf) son modelados como una suavización exponencial del crecimiento de los accidentes, con una demora medida en años (m).			Medida de desempeño

Tabla 1. Variables del modelo matemático de accidentalidad detallando su formulación, descripción, unidades, carácter técnico y funcional

La validación del modelo se llevó a cabo comparando su comportamiento contra datos históricos de accidentalidad

registrados en la ciudad de Bogotá entre el año 2004 y 2015

[33, p. 40]. La disponibilidad de datos no es muy significativa, lo cual dificultó sensiblemente el proceso de calibración del modelo propuesto para su posterior validación.

Tras realizar la calibración de parámetros con la ayuda de las herramientas del aplicativo Vensim, se logró realizar un ajuste significativo encontrando que el modelo representa satisfactoriamente el comportamiento histórico de la accidentalidad (Ver Tabla 2).

<i>Fuente</i>	<i>Media*</i>	<i>Desviación estandar*</i>	<i>Coeficiente de variación (%)</i>
Modelo simulado	31642.7	2068.3	0.06537
Histórico	35739.2	3088.9	0.08643

Tabla 2. Comparación de los resultados de los datos históricos y el modelo simulado para la variable Número de accidentes 2002-2015 (\* Unidades en accidentes por año)

Los resultados obtenidos permiten establecer que las medias de la accidentalidad de los dos conjuntos de datos (simulado y real) guardan similitud, y que sus coeficientes de variación son bastante reducidos.

### III. RESULTADOS OBTENIDOS

El modelo fue sometido a análisis de sensibilidad con el fin de encontrar los parámetros que tuvieran mayor impacto en el número de accidentes. Se seleccionaron aquellos parámetros que fuesen factibles de ser objeto de modificación como resultado de políticas empresariales o gubernamentales. Se corrieron 200 simulaciones con distintos valores para cada parámetro de acuerdo con distribuciones de probabilidad uniformes con rangos coherentes con la naturaleza de cada parámetro. El coeficiente de variación de la variable “Accidentes” fue utilizado como medida de desempeño para el análisis de sensibilidad y con base en él se pudo encontrar que el sistema reacciona principalmente a los parámetros “Máximo número de trabajos represados aceptados” (MaxTRA) y “Tiempo de reconocimiento cambios en accidentalidad” (TRecCAcc). También fue analizado el parámetro “Tiempo de conversión por controles de tráfico” (TConvCTraf) pero no generó variación importante (Ver Tabla 3).

<i>Parámetro</i>	<i>Distribución de probabilidad</i>	<i>Coeficiente de variación</i>
MaxTRA	Uniforme (80;120)	0.18386
TRecCAcc	Uniforme (0.2; 0.8)	0.07108
TConvCTraf	Uniforme (0.01; 0.4)	0.00815

Tabla 3. Coeficientes de variación para la variable “Accidentes” según los parámetros estudiados y distribuciones de probabilidad utilizadas para el análisis de sensibilidad

Para cada uno de los parámetros señalados se constituyó un conjunto de escenarios. En cada conjunto de escenarios se estudió el impacto que tiene el parámetro especificado en cuatro medidas de desempeño: Accidentes, Controles de tráfico, Conductores responsables y Productividad laboral.

#### A. Escenarios de Eficacia de la autoridad de tránsito

El primer conjunto de escenarios hace referencia a la “Eficacia de la autoridad de tránsito”. Para ello se ajustaron distintos valores para el parámetro “Tiempo de reconocimiento de los cambios en la accidentalidad” (TRecCAcc). Este parámetro da cuenta de la posibilidad de incidir en la detección de los aumentos en la accidentalidad por parte de las autoridades de tránsito. En la medida en que este tiempo sea mayor, la autoridad vial experimentará una mayor demora en el reconocimiento de los altos niveles de accidentalidad y por lo tanto se tardará más en aplicar medidas que permitan hacer que los conductores imprudentes se conviertan en responsables.

Se plantearon tres escenarios de simulación modificando el valor de este tiempo (Ver Tabla 4 y Figura 3).

<i>Nombre Escenario</i>	<i>TRecCAcc</i>
Política 1-2	0.375 años
Simulación original	0.5 años
Política 1-1	0.785 años

Tabla 4. Conjunto de escenarios “Eficacia de la autoridad de tránsito”

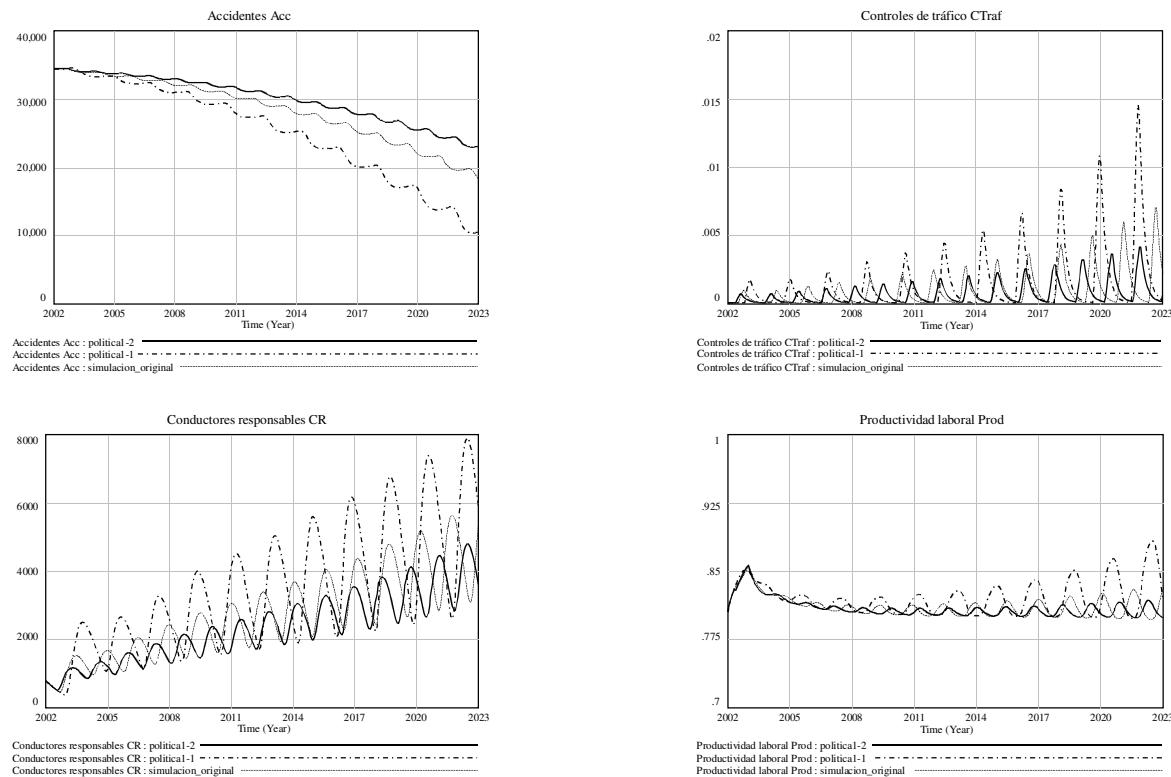


Figura 3. Resultados de conjunto de escenarios “Eficacia de la autoridad de tránsito”

Un mayor tiempo para reconocer cambios en la accidentalidad por parte de la autoridad policial, genera una menor accidentalidad (Escenario Política 1-1). Lo contrario sucede cuando se tiene un menor tiempo (Escenario Política 1-2). Esta respuesta por parte del sistema parece ser paradójica, pues si las autoridades se demoran en enfrentar el problema, se entendería que los efectos del problema se amplían. La explicación radica en la amplitud y periodo de las oscilaciones de los controles de tráfico: un aumento en el tiempo de reconocimiento de cambios en la accidentalidad genera una mayor amplitud y periodo en los “Controles de tráfico”, lo que a su vez implica menores controles. El sistema experimenta un proceso de relajación, aunque cada vez los controles resultan tener mayor amplitud, es decir que son más exigentes. Ello genera entonces el crecimiento que se observa para la variable “Conductores responsables”, y esto trae consigo la mencionada disminución del número de “Accidentes”.

De otro lado, el sistema genera una mayor “Productividad laboral”, lo cual a su vez refuerza el sostenimiento del bajo número de accidentes.

Cuando se opta por aplicar un menor tiempo para reconocer cambios en la accidentalidad (Escenario Política 1-2), el sistema se ve sometido a más controles de tráfico (menor periodo) pero con menor amplitud. Este comportamiento genera una menor transferencia de conductores imprudentes a

susceptibles y con ello se logra una mayor accidentalidad.

#### B. Escenarios de “Presión laboral para cumplimiento de metas”

El segundo conjunto de escenarios estudiado se titula “Presión laboral para cumplimiento de metas”. Se modela a través del parámetro “Máximo número de trabajos represados aceptados” (MaxTRA) y este hace referencia a la presión que experimentan los conductores de vehículos en sus actividades operativas que en últimas les obliga a exigir una mayor velocidad de desplazamiento en la ciudad. La mayor velocidad es una estrategia perseguida por el conductor para aumentar su productividad y con ello lograr reducir la presión experimentada. Se desarrollaron simulaciones con valores por encima y por debajo de la condición original (Ver Tabla 5) y sus resultados fueron analizados para las cuatro medidas de desempeño definidas (Ver Figura 4).

Nombre del escenario	MaxTRA
Política 3-2	112.5 trabajos
Simulación	100 trabajos
Política 3-1	87.5 trabajos

Tabla 5. Conjunto de escenarios “Presión laboral para cumplimiento de metas”

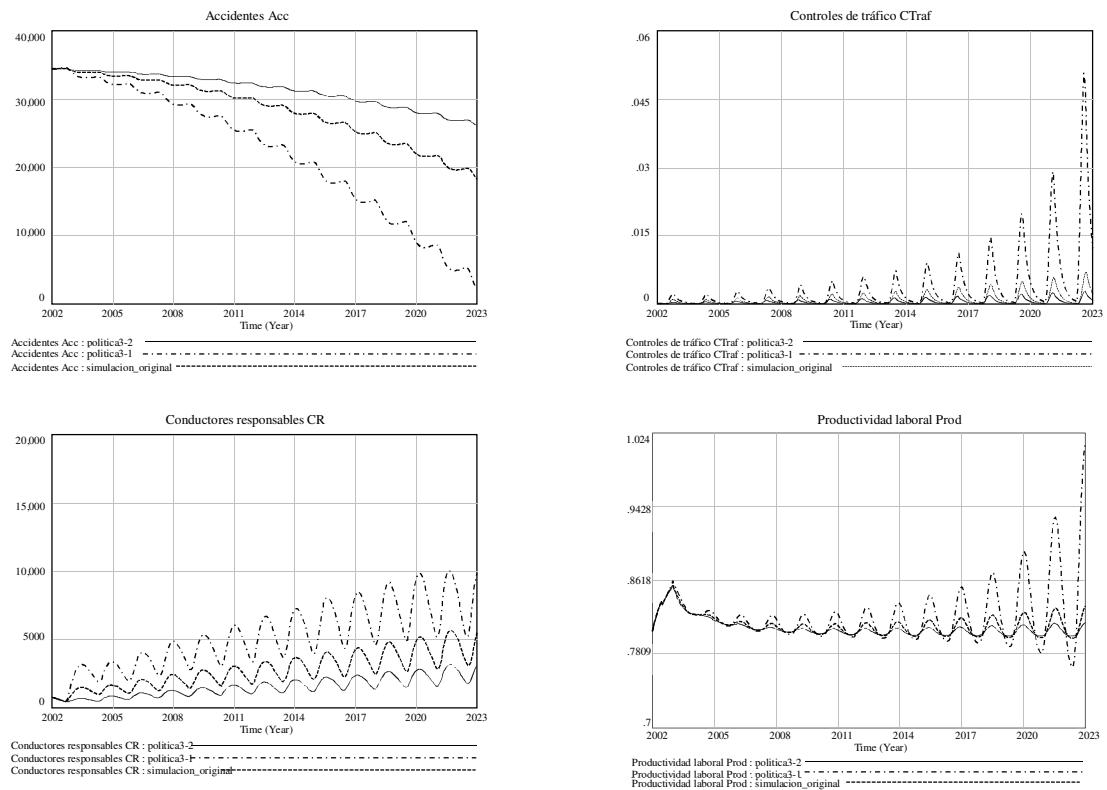


Figura 4. Resultados de conjunto de escenarios “Presión laboral para el cumplimiento de metas”

La política 3-1, de disminución del parámetro “Máximo número de trabajos represados aceptados”, hace que se incremente la exigencia laboral (una meta más baja es más exigente en este caso). El número de accidentes se reduce sensiblemente. Se destaca además en las simulaciones que los controles de tráfico conservan el mismo periodo, pero la amplitud para la política 3-1 es significativamente mayor a la experimentada en los conjuntos de escenarios previamente expuestos. Se observa además que la productividad laboral se incrementa como respuesta del sistema a la mayor exigencia laboral sometida. La mezcla de menores accidentes y mayor velocidad intencionada, logran este aumento de la productividad.

Las políticas que permitieron obtener un menor número de accidentes fueron Política 1-1 y Política 3-1 (Ver Figura 5). Estas políticas implican respectivamente un mayor tiempo de reconocimiento de cambios en la accidentalidad y una mayor exigencia en materia de productividad para los sectores económicos asociados al transporte. Así, la mezcla de productividad, menos controles de tráfico, pero mayor severidad cuando se ejecutan permite al sistema reducir sensiblemente la accidentalidad frente a otras posibilidades.

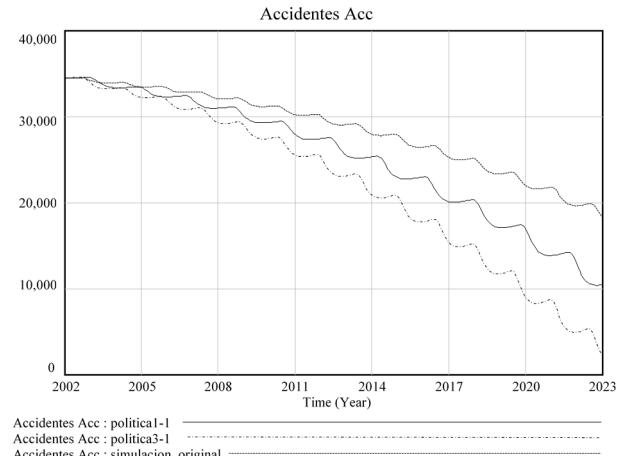


Figura 5. Comparación de las políticas 1-1 y 3-1

#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo realizado permitió construir un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas en el cual se pueden explorar las relaciones causales entre la productividad operativa y la accidentalidad vial a la luz de las políticas de seguridad vial de las autoridades gubernamentales.

El proceso metodológico permitió aplicar de manera coherente el modelo SIR de flujo poblacional [32, p. 303] considerando en este caso que la imprudencia vial puede ser estudiada como un comportamiento contagioso, más que como

una característica aislada de la personalidad del conductor. Si bien otros estudios han trabajado esta propuesta [34], se sugiere que sea abordada en estudios posteriores que consideren con mayor peso al carácter sicológico y comportamental del conductor. Este proceso permitió reconocer tres estados posibles para la caracterización de los conductores: imprudentes, responsables y aquellos que son susceptibles de volver a ser imprudentes.

La exigencia laboral y los controles de tráfico son los dos factores fundamentales que regulan el flujo de conductores susceptibles a imprudentes y de imprudentes a responsables. La inclusión de la productividad en las operaciones logísticas como estrategia empresarial, puede ayudar a tener niveles mucho más bajos de accidentalidad.

La exploración realizada en este trabajo sugiere que la exigencia en materia de eficacia (entrega de resultados) hacia los transportadores, sin el adecuado fortalecimiento de su eficiencia (la forma como entregan los resultados) tiene directas implicaciones en la accidentalidad vial. Los aumentos en la accidentalidad generan disminuciones sustantivas en la productividad y ello a su vez genera una mayor carga laboral con un consecuente reforzamiento de la accidentalidad. La alternativa consiste en explorar otros mecanismos como la eficiencia operacional en las labores de transporte, almacenamiento y distribución.

Las autoridades viales pueden utilizar estrategias como: realizar unos controles policiales continuos procurando mantener baja la accidentalidad, o realizarlos a mayores intervalos de tiempo, pero con mayor intensidad, de tal manera que cada vez que se haga, se reduzca la accidentalidad. Para la primera estrategia, se encuentra que la acción policial no está generando cambios significativos en el comportamiento de los usuarios. Por el contrario, la acción policial aumenta la accidentalidad dado que el sistema se “acostumbra” a trabajar con los controles permanentes al tiempo que procura responder con mayor velocidad ante la exigencia laboral.

Por otro lado, la segunda estrategia puede ser más efectiva, pues al contar con controles policiales con menor frecuencia, pero mayor intensidad, los conductores imprudentes se convierten más rápidamente en conductores responsables.

En materia de productividad operacional de las empresas, se encuentra que, al contar con unos controles de tráfico más exigentes, pero menos seguidos y una mayor exigencia laboral soportada en mayor productividad (mejores formas de conducir, asignación de rutas con soporte estadístico y otras técnicas de ruteo) se pueden lograr los mejores resultados en materia de accidentalidad vial.

Se ratifica la necesidad generar políticas empresariales que incidan en las operaciones logísticas de transporte con mejores herramientas para incrementar la productividad del sector. Estas políticas deben reconocer la naturaleza humana al conducir y las demoras que hay entre los procesos de aprendizaje y des aprendizaje acerca de los riesgos al conducir.

Este trabajo ha permitido resaltar en primer lugar la importancia de las variables asociadas a la productividad, al aprendizaje, a las estrategias de controles de tráfico y la forma como ellas se relacionan para incidir en la accidentalidad. Es claro además que la exigencia laboral manejada de forma inteligente permite alcanzar mejores niveles de productividad y ello promueve una baja en la accidentalidad, pero ocurre también que la mayor accidentalidad disminuye la productividad y esto genera al tiempo mayor carga laboral, pero con el atenuante de un costo en materia de accidentes.

La estrategia por impulsar consiste en mantener la presión laboral, pues es una condición del mercado, pero fortalecer las competencias de quienes dirigen y actúan en el sector del transporte para hacer más eficientes sus operaciones y con ello evitar caer en el círculo de la accidentalidad vial con sus consecuencias en materia de productividad.

Finalmente, se deben reconocer las debilidades del modelo y ellas se fundamentan en los aspectos de poca información cuantitativa disponible para la validación, necesidad de involucrar variables asociadas a los otros dos principales factores de la accidentalidad: el estado del parque automotor y el estado de la malla vial. La inclusión de estos elementos en el modelo podrá servir para la formulación de políticas públicas en materia de seguridad vial, mantenimiento de malla vial y de respuesta ante un problema de salud pública como lo es la accidentalidad. Estos nuevos trabajos podrán a su vez orientarse con un mayor número de escenarios y comparaciones y ser analizados bajo distintos objetos de estudio: distritos, ciudades o regiones económicamente identificables.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean reconocer el trabajo de los ingenieros Walter Yavid Hernández y Diana Mireya Peña, cuya gestión en la elaboración de trabajos previos constituye fundamento para el actual desarrollo.

## REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud, “10 datos sobre la seguridad vial en el mundo”, *Organización Mundial de la Salud*, jul-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.who.int/features/factfiles/roadsafety/es/>. [Consultado: 17-feb-2017].
- [2] Organización Panamericana de la Salud, “La seguridad vial en la Región de las Américas.” Organización Panamericana de la Salud, 2016.
- [3] D. Y. Rodríguez, F. J. Fernández, y H. Acero Velásquez, “Road traffic injuries in Colombia”, *Inj. Control Saf. Promot.*, vol. 10, núm. 1-2, pp. 29-35, jun. 2003.
- [4] J. Posada, E. Ben-Michael, A. Herman, E. Kahan, y E. Richter, “Death and injury from motor vehicle crashes in Colombia”, *Rev. Panam. Salud Pública Pan Am. J. Public Health*, vol. 7, núm. 2, pp. 88-91, feb. 2000.
- [5] G. Cabrera, N. Velásquez, y M. Valladares, “Seguridad vial, un desafío de salud pública en la Colombia del siglo XXI”, *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 27, núm. 2, pp. 218-225, 2009.
- [6] W. Haddon, “A logical framework for categorizing highway

safety phenomena and activity”, *J. Trauma*, vol. 12, núm. 3, pp. 193–207, mar. 1972.

[7] A. Azadeh, M. Zarrin, y M. Hamid, “A novel framework for improvement of road accidents considering decision-making styles of drivers in a large metropolitan area”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 87, pp. 17–33, 2016.

[8] S. Clarke, “Injuries and Accidents: Psychosocial Aspects”, en *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)*, Second Edition., J. D. Wright, Ed. Oxford: Elsevier, 2015, pp. 130–134.

[9] A.-K. Lindberg, S. O. Hansson, y C. Rollenhagen, “Learning from accidents – What more do we need to know?”, *Saf. Sci.*, vol. 48, núm. 6, pp. 714–721, 2010.

[10] G. Zhang, K. K. W. Yau, y G. Chen, “Risk factors associated with traffic violations and accident severity in China”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 59, pp. 18–25, 2013.

[11] C. G. Castellanos Barrero, “Análisis de accidentalidad en la vía Armenia-Ibagué ruta 4003 del corredor vial del pacífico, sector: Calarcá-Cajamarca PR 3+0900 al PR 50+0000. Años 2005-2007”, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Manizales, Colombia, 2008.

[12] D. Dinges, “An overview of sleepiness and accidents”, *J. Sleep Res.*, vol. 4, núm. S2, pp. 4–14, dic. 1995.

[13] J. S. Carroll, J. W. Rudolph, y S. Hatakenaka, “Learning from experience in high-hazard organizations”, *Res. Organ. Behav.*, vol. 24, pp. 87–137, 2002.

[14] S. Dekker, D. Siegenthaler, y T. Laursen, “Six Stages to the new View of Human Error”, *Saf. Sci. Monit.*, vol. 11, núm. 5, pp. 1–5, 2007.

[15] L. Dorn y D. Barker, “The effects of driver training on simulated driving performance”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 37, núm. 1, pp. 63–69, ene. 2005.

[16] T. Assum, “Attitudes and road accident risk”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 29, núm. 2, pp. 153–159, mar. 1997.

[17] N. Minami y S. Madnick, “Using systems analysis to improve traffic safety”, en *Traffic Safety*, C. Ferraro, Ed. Nova Science Publishers, 2011, p. 330.

[18] V. Gitelman, A. Hakkert, E. Doveh, y A. Cohen, “A study of safety effects of road infrastructure improvements under Israeli conditions”, en *Proceedings of International Conference Traffic Safety on Three Continents, Moscow, Russia (CD-ROM)*, 2001.

[19] E. Bekiaris, E. Gaitanidou, K. Kalogirou, M. I. Gaudry, J. T. Kennedy, y S. B. Matena, “Road infrastructure safety”, *Bundesanst. Für Stras Senwesen Reihe*, p. 147.

[20] M. D. Soto Torres, R. Fernández Lechón, y P. Fernández Soto, “Road Safety Strategies: An Analysis with System Dynamic”, presentado en The 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland, 2012.

[21] S. N. Kumar y G. Umadevi, “Application of System Dynamic Simulation Modeling in Road Safety”, en *3rd International Conference on Road Safety and Simulation*, Indianapolis, 2011.

[22] Y. M. Goh y P. E. D. Love, “Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy”, *Saf. Sci.*, vol. 50, núm. 7, pp. 1594–1605, ago. 2012.

[23] S. A. Contreras Ulloa, J. A. Loyola Díaz, C. G. González Torres, E. P. Villegas Sánchez, y K. A. Valencia Varas, “Modelo Dinámico Sistémico: Caso análisis de Accidentes de Tránsito en Trujillo-Perú”.

[24] P. M. Salmon y M. G. Lenné, “Miles away or just around the corner? Systems thinking in road safety research and practice”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 74, pp. 243–249, ene. 2015.

[25] J. Aracil y F. Gordillo, *Dinámica de sistemas*. Madrid: Alianza, 1997.

[26] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems thinking and modelling for a complex world*. Mc Graw Hill, 2000.

[27] J. Lyneis y S. E. Madnick, “Preventing Accidents and Building a Culture of Safety: Insights from a Simulation Model”, *SSRN Electron. J.*, 2008.

[28] E. Duarte Forero, “El transporte público colectivo en Bogotá, D.C.: Una mirada desde la dinámica de sistemas”, *Ingiería*, vol. 16, núm. 2, pp. 18–34, 2011.

[29] K. ABBAS, “The use of system dynamics in modelling transportation systems with respect to new cities in Egypt”, presentado en 8th International Conference of the System Dynamics Society, Chestnut Hill, Massachusetts, Estados Unidos, 1990.

[30] M. Schaffernicht, *Indagación de situaciones complejas mediante la dinámica de sistemas*, vol. 1, 2 vols. Talca, Chile: Universidad de Talca, 2009.

[31] J. Forrester, *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA: Productivity Press, 1961.

[32] H. Rahmandad y J. D. Sterman, “Reporting guidelines for simulation-based research in social sciences: Reporting Guidelines for Simulation-Based Research”, *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 28, núm. 4, pp. 396–411, oct. 2012.

[33] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Movilidad en cifras”. Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2014.

[34] D. M. Peña, W. Hernández, E. L. Duarte-Forero, y S. Meneses Velosa, “Systemic analysis of traffic accidents in freight transport”, Unpublished, 2017.