

MODELO DE EVALUACIÓN DINÁMICA DE LA CALIDAD EN LA INFRAESTRUCTURA VIAL DE CORREDORES LOGÍSTICOS EN COLOMBIA

✉ JAIRO ALBERTO GÓMEZ LIZARAZO¹
CONRADO AUGUSTO SERNA URÁN²
MARTÍN DARÍO ARANGO SERNA³

RESUMEN

En el presente artículo se modeliza el comportamiento de la infraestructura vial de los corredores logísticos de Colombia, utilizando dinámica de sistemas para evaluar los efectos de las políticas de inversión que se realizan en la red pavimentada. Para ello, se consideran cinco categorías que permiten evaluar la calidad de la red pavimentada definidas por el Instituto Nacional de Vías y Transporte – INVIAS. El modelo contiene la parametrización para evaluar el desgaste de las vías en función de tráfico promedio y de las inversiones que se realizan para la rehabilitación y el mantenimiento de las vías.

PALABRAS CLAVE: Dinámica de sistemas; desgaste de pavimentos; índice de rugosidad internacional; estado de la red vial; corredor logístico.

DYNAMIC MODEL FOR QUALITY ASSESSMENT OF LOGISTICS CORRIDOR ROAD INFRASTRUCTURE IN COLOMBIA

ABSTRACT

In this paper the behavior of the road infrastructure of logistics corridors in Colombia is modeled using system dynamics to assess the impact of investment policies carried out in the paved road network. Five categories are considered for assessing the quality of the paved road network as defined by the Instituto Nacional de Vías y Transporte (INVIAS). The model contains parameters for evaluating road wear based on average traffic and the investments made for road rehabilitation and maintenance.

KEYWORDS: System dynamics; Pavement wear; International roughness index; State of the road network; Logistics corridor.

¹ Maestría en Ingeniería. Profesor Universidad EIA.

² Ingeniería industrial. Maestría en ingeniería administrativa. Doctorado en ingeniería Industria y Organizaciones. Universidad de San Buenaventura.

³ Director del Grupo I+D+I Logística Industrial - Organizacional "GICO". Profesor Titular, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.



Autor de correspondencia: Gómez Lizarazo J.A. (Jairo Alberto): Universidad EIA, Km 2 + 200 vía aeropuerto José María Córdova, Envigado, Colombia/ Tel.: 354 90 90
Correo electrónico: jairo.gomez@eia.edu.co

Historia del artículo:

Artículo recibido: 24-VII-2015 / Aprobado: 17-V-2016
Disponible online: 30 de octubre de 2016
Discusión abierta hasta octubre de 2017

MODELO DE AVALIAÇÃO DINÂMICA DA QUALIDADE EM INFRA-ESTRUTURA VIAL DE ESTRADAS LOGÍSTICAS NA COLÔMBIA

RESUMO

Em este artigo, se modeliza o comportamento da infraestrutura rodoviária de corretores de logística da Colômbia, usando a dinâmica de sistemas para avaliar o impacto das políticas de investimento realizados na rede pavimentada. Para este fim, consideram-se cinco categorias para avaliar a qualidade da rede pavimentada definido pelo Instituto Nacional de Vias y Transporte - INVIAS. O modelo contém os parâmetros para avaliar o desgaste de estradas, dependendo do tráfego e dos investimentos, feitos para a reabilitação e manutenção de estradas.

PALAVRAS- CHAVE: Dinâmica de sistemas; Desgaste do pavimento; Índice de rugosidade internacional; Estado da rede rodoviária; Corredor logístico.

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es uno de los pilares más importantes en el funcionamiento de una ciudad y de un país, ya que facilita las comunicaciones, el comercio, el turismo y el desarrollo de la economía. El modo de transporte terrestre —por carretera— representa el porcentaje más alto de uso para el movimiento de mercancías y de personas, en comparación con los demás modos existentes disponibles en el país, lo cual hace que sea objeto de especial atención dada su importancia para el desarrollo y funcionamiento correcto de las actividades logísticas en Colombia (Fedesarrollo, 2013).

Toda infraestructura de transporte, especialmente las vías, tiene un ciclo de vida básico: construcción, mantenimiento y desmantelado (Schaffernicht, 2012). La entidad encargada de asignar, regular y supervisar estas actividades en Colombia es el Instituto Nacional de Vías y Transporte (IN-VÍAS), la cual tiene definidas cinco categorías para el estado de la red vial: Muy Bueno, Bueno, Regular, Malo y Muy Malo. Estas categorías tienen una correspondencia con el índice de rugosidad internacional el cual sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de una vía y fue aceptado por el Banco Mundial en 1986 (Arria-

ga, Garnica y Rico, 1998) como estándar de medida para la regularidad superficial de un camino.

El caso de estudio abordado en este trabajo, considera el comportamiento de la calidad en seis corredores logísticos existentes en Colombia en un horizonte de 15 años durante la etapa de mantenimiento de la vía en su ciclo de vida. Haciendo uso de la herramienta Dinámica de Sistemas, se modeliza el comportamiento de la calidad de las vías, determinando las relaciones establecidas entre el estado de las vías en cada categoría (Kilómetros Muy Buenos, Buenos, Regulares, Malos o Muy Malos), el tráfico promedio diario, el índice de rugosidad internacional y diferentes tipos de intervención restringidas por la disponibilidad de recursos y las políticas de asignación.

El crecimiento productivo, la infraestructura y el sistema logístico de un país es determinante para la competitividad económica. Por ello, el desarrollo de la logística (como articulador entre la infraestructura física y los servicios asociados), contribuye a enfrentar adecuadamente las previsiones de comercio exterior y a dinamizar el flujo de mercancías, haciendo más eficiente la estructura de costos logísticos y de distribución física” (Departamento Nacional de Planeación, 2013).

El transporte es una de las funciones logísticas (Bowersox, Closs y Cooper, 2008; Rushton,

Croucher y Baker, 2006; Chopra y Meindl, 2008) y tiene un impacto directo en la competitividad de una región y de un país (Pascua y Gento, 2010; Álvarez, Pabón y Ortiz, 2010; CEPAL & OCDE, 2013; Kunaka y Carruthers, 2014). “...Un corredor logístico es aquel que articula de manera integral orígenes y destinos en aspectos físicos y funcionales como la infraestructura de transporte, los flujos de información y comunicaciones, las prácticas comerciales y de facilitación del comercio.” (Departamento Nacional de Planeación, 2008). El desempeño de un corredor puede ser evaluado desde tres puntos de vista: calidad de la infraestructura, de los servicios y el movimiento de bienes (National Research Council, 2000; Arnold, 2006; Muñuzuri, Grosso, Cortes, y Guadix, 2011; Arvis, Raballand y Marteau, 2010).

Este artículo se organiza presentando, en primer lugar, las variables que serán usadas en el desarrollo y análisis del modelo y que fueron obtenidas de una revisión de documentos de entidades gubernamentales e investigaciones previas; en segundo lugar se presenta el diagrama causal que representa la relación entre las variables identificadas y los bucles de retroalimentación respectivos. Posteriormente, se desarrolla el diagrama de Flujos y Niveles que describe la formulación matemática del modelo. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos y se hace un análisis de sensibilidad para soportar políticas de actuación sobre la red para asegurar su calidad.

2. METODOLOGÍA

La teoría de sistemas recomienda hacer un análisis holístico, que permita no solo conocer y comprender cada elemento en el sistema, sino también la interrelación que existe entre estos y su efecto sobre el total del sistema (Richmond, 1993). La dinámica de sistemas propone una metodología que conduce a estructurar y mejorar los modelos mentales hasta tener un modelo de simulación que reproduzca comportamientos históricos del sistema de referencia y en cuyas estructuras causales

se mantiene una coherencia lógica entre sistema y modelo (Schaffernicht, 2012).

Utilizando la metodología propuesta por Sterman (2002) se identifican las variables relevantes que afectan la calidad de las vías pavimentadas en los corredores logísticos en Colombia en el Documento E-Transcol #10 (Universidad Nacional de Colombia, 2014). Dichas variables identificadas se clasifican en función de las categorías usadas en dinámica de sistemas, es decir, como variables de nivel, variables de flujo, variables auxiliares y parámetros. La **Tabla 1** presenta dichas variables y su clasificación.

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE VARIABLES EN EL SISTEMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, (2015)

Tipo de variable	Nombre de la variable
Nivel	Kilómetros Muy Buenos
	Kilómetros Buenos
	Kilómetros Regulares
	Kilómetros Malos
	Kilómetros Muy Malos
Auxiliar	Inversión nacional total para rehabilitación y mantenimiento
	Tasa de inversión por corredor Regulares
	Tasa de inversión por corredor Malos
	Tasa de inversión por corredor Buenos
	Efecto mantenimiento periódico y rutinario
	Efecto inversión en Kilómetros Muy Malos
	Efecto de inversión Kilómetros Buenos
	Proporción de kilómetros regulares sometidos a mantenimiento
Proporción de Kilómetros Malos sometidos a mantenimiento	
Flujo	Rehabilitación de Kilómetros Muy Malos
	Mantenimiento Kilómetros Regulares
	Mantenimiento Kilómetros Malos
	Mantenimiento Kilómetros Buenos
	Desgaste Kilómetros Muy Buenos
	Desgaste Kilómetros Buenos
	Desgaste Kilómetros Regulares
Desgaste Kilómetros Malos	

Parámetros	Porcentaje de inversión en rehabilitación
	Costo de rehabilitación por Kilómetro
	Costo de mantenimiento por kilómetro bueno
	Porcentaje de inversión por corredor
	Costo por kilómetro de mantenimiento rutinario
	Costo por kilómetro de mantenimiento periódico
	Porcentaje de inversión en mantenimiento rutinario
	Porcentaje de inversión en mantenimiento periódico
Tasa de desgaste en kilómetros Muy Buenos, Buenos y Regulares	

De acuerdo a lo establecido por Roda (2009) se identificó la correspondencia del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) con las categorías establecidas por INVÍAS. Esta correspondencia se presenta en la **Tabla 2**, en la que se clasifica los kilómetros de la carretera que compone la red vial nacional existente en las categorías establecidas por el IRI.

TABLA 2. CORRESPONDENCIA IRI Y CLASIFICACIÓN CON INVÍAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE RODA (2009)

Categoría de Estado	Clasificación INVÍAS	IRI
Muy Bueno	MB	<2,5
Bueno	B	<3,5
Regular	R	<4,5
Malo	MB	<5,5
Muy Malo	MM	>5,5

La **Tabla 3** presenta el estado de la red vial nacional para el año 2013, de acuerdo a esta clasificación.

TABLA 3. ESTADO DE LA RED VIAL NACIONAL. FUENTE: TOMADA DE INVÍAS (2013)

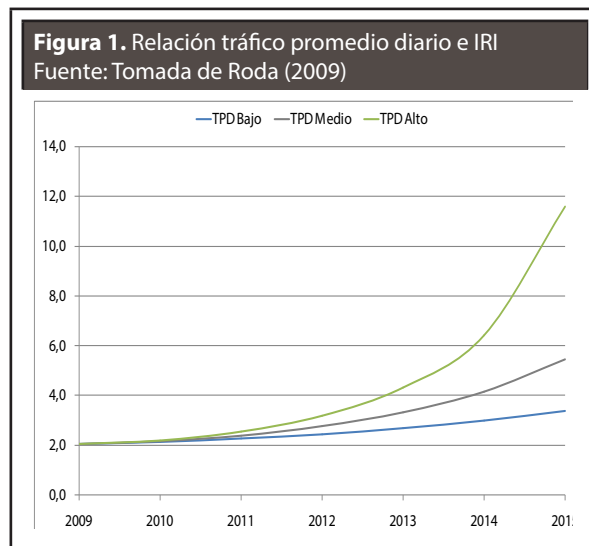
TOTAL RED	Red Pavimentada					
	MB	B	R	M	MM	Total
Longitud (Km)	1.837	3.021	2.530	1.253	64	8.705
%	21,1%	34,7%	29,1%	14,4%	0,7%	100%

El estado de una vía visto desde el IRI depende de su estado inicial y del desgaste o deterioro producido por los volúmenes de tránsito (Arriaga *et al.*, 1998), los cuales se clasifican en bajo, medio o alto, dependiendo de la cantidad de vehículos que transitan por la vía, como lo muestra la **Tabla 4**.

TABLA 4. CLASIFICACIÓN TRÁFICO PROMEDIO DIARIO, FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE RODA (2009)

Vehículos/día	TPD
<2941	Bajo
2942-5254	Medio
>5255	Alto

La evaluación ex-post del Programa Integral de Rehabilitación y Mantenimiento Vial y cuantificación del pasivo vial de la Red Vial Nacional, establecido por el INVÍAS, permite identificar la relación entre el tráfico promedio diario (TPD) y el valor del índice de rugosidad internacional en el tiempo, como se muestra en la **Figura 1** (Roda, 2009).



La base para determinar la inversión para realizar el mantenimiento en cada corredor logístico, con la política pública en Colombia para el mantenimiento de la red vial al año 2009, es de una asignación global de 515.000 millones de pesos de los cuales 34% se destina al mantenimiento rutinario, 14% al mantenimiento periódico, 32% para rehabilitaciones, 10%

para los kilómetros en buen estado y 10% para la red de afirmado (Roda, 2009).

La **Tabla 5** presenta la longitud de los corredores logísticos analizados.

TABLA 5. LONGITUD DE LOS CORREDORES LOGÍSTICOS. FUENTE: TOMADO DE UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (2014)	
Corredor	Longitud (km)
Medellín - Cali	424
Bogotá - Barranquilla	948
Bogotá - Cali	464
Bogotá - Bucaramanga	394
Medellín - Bucaramanga	399
Bogotá - Villavicencio	88
TOTAL	2717

Para el desarrollo del modelo en Dinámica de sistemas se adoptan los siguientes supuestos:

- La distribución del estado de la red vial nacional, según el IRI, de cada uno de los corredores estudiados fue la mostrada en la **Tabla 3**.
- La asignación de inversión para las diferentes intervenciones, rehabilitación de los tramos muy malos, mantenimientos periódicos y rutinarios se deciden en forma proporcional a la longitud de cada corredor.
- Los costos de intervención por kilómetro son constantes durante la simulación.
- Los periodos de intervención de las vías en mantenimiento se consideran constantes y anuales.
- El valor de la inversión en mantenimiento anual nacional es constante durante el periodo de simulación.

3. DIAGRAMA CAUSAL

Para determinar la variación de la calidad de las vías en las categorías anteriormente mencionadas, se trata cada una de las categorías de calidad como variables de nivel. El cambio de categoría de una vía ocurre debido a las tasas de desgaste y a las intervenciones de mantenimiento. Se incluyeron como intervenciones el Mantenimiento Rutinario,

el Mantenimiento Periódico, y la Rehabilitación. Es importante resaltar que se asume que después de cualquier tipo de intervención el estado de la vía vuelve a Muy Bueno (Arriaga *et al.*, 1998).

Las relaciones entre las diferentes variables de interés pueden ser representadas a partir de un diagrama de causalidad, el cual, además de permitir visualizar las relaciones causa-efecto que se dan en el sistema, facilita la identificación de ciclos de balance y de realimentación (Kirkwood, 1998). Los diagramas causales permiten observar cómo las variables se comportan a lo largo del tiempo, modelar la retroalimentación del sistema en función de sus componentes, los flujos de información, la estructura, los retardos que pueden presentarse en el tiempo para lograr un comportamiento, y adicionalmente permiten contemplar las relaciones no lineales de los elementos estudiados (Holling y Meffe, 1996; Serman, 2002; Hjorth y Bagheri, 2006).

En el diagrama causal desarrollado para el modelo de la red vial, se presenta en la **Figura 2** donde se evidencian tanto ciclos de refuerzo como de balance. Los ciclos de refuerzo producen un efecto de manera tal que hace aumentar o disminuir una variable, mientras que los ciclos de balance causan un comportamiento asintótico en la variable de nivel (Universidad Nacional de Colombia, 2014).

Los ciclos de balance y de refuerzo se explican a continuación, teniendo en cuenta que las categorías presentadas (kilómetros Muy Malos, kilómetros Malos, kilómetros Regulares, kilómetros Buenos y kilómetros Muy Buenos) tienen un orden secuencial.

Ciclos de balance

En el diagrama causal del caso de estudio “Comportamiento dinámico de la calidad de la infraestructura vial en seis corredores logísticos en Colombia” se presentan dos estructuras generales que presentan balance.

- La primera relación es la que existe entre la cantidad de kilómetros en un estado y su respectivo desgaste. Todos los kilómetros que se

encuentren en un estado debido al desgaste pasarán a una categoría inferior, disminuyendo entonces los kilómetros que se encontraban en un mejor estado. Los ciclos que presentan esta estructura son los B1, B2, B3 y B8 de la **Figura 2**.

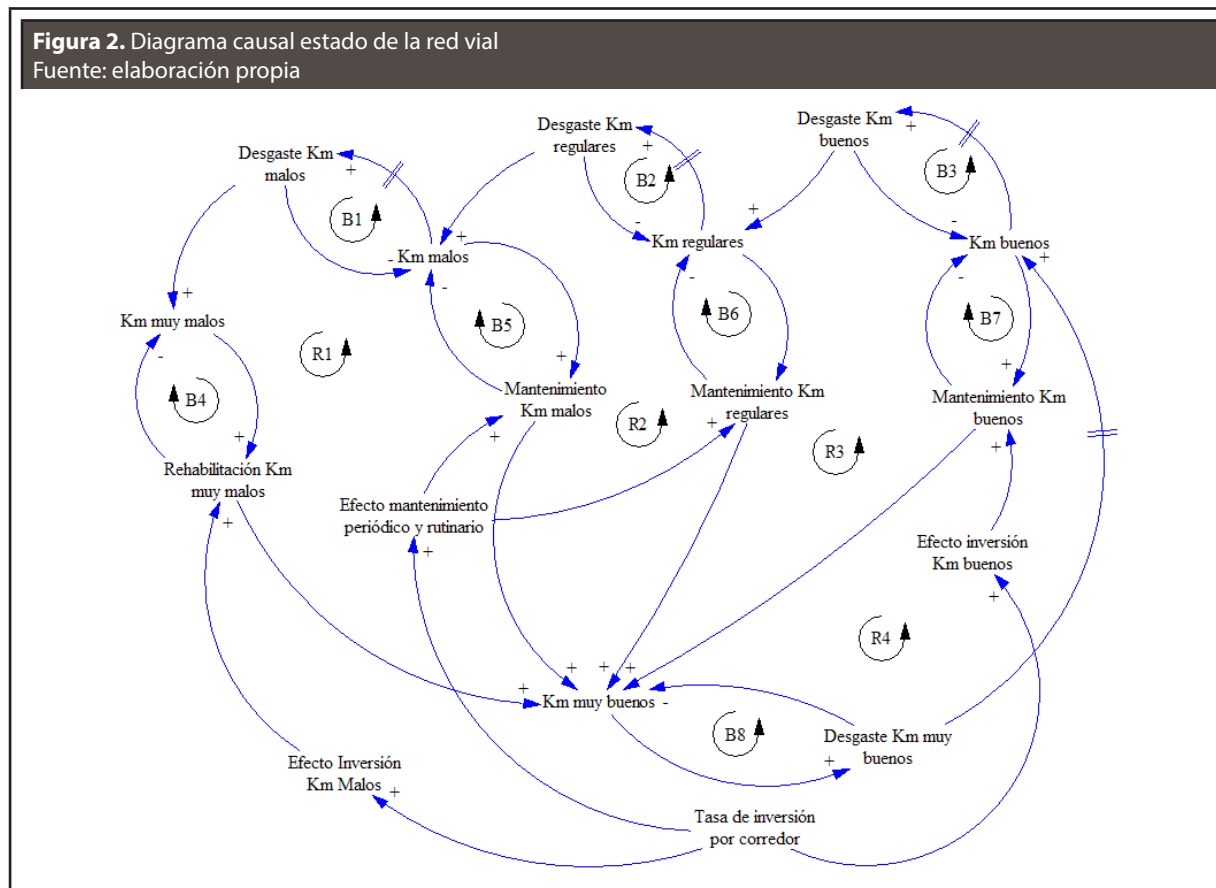
- La segunda relación es la que se establece entre la cantidad de kilómetros en un estado, y su respectiva intervención genera un segundo bucle de balance, puesto que si existen más kilómetros en una categoría, mayor será la intervención requerida, aunque restringida por el valor del presupuesto destinado para tal fin, lo que trae como efecto la disminución de los kilómetros en ese estado, dado que sin importar el tipo de intervención, pasarán a ser kilómetros Muy Buenos. Los ciclos que presentan este comportamiento son los B4, B5, B6 y B7.

Ciclos de refuerzo

En el diagrama causal presentado en la **Figura 2**, se presenta una estructura general que define los ciclos de refuerzo presentes en él. Estos son consecuencia de la relación entre el estado de un kilómetro, su mantenimiento y su transición a los kilómetros Muy Buenos, y en el resto de categorías el retorno hasta su estado inicial debido al desgaste. Los ciclos que presentan este comportamiento son los R1, R2, R3 y R4 presentados en la **Figura 2**.

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

Un factor determinante y necesario para que el mantenimiento vial se lleve a cabo, es la inversión destinada para ello. En Colombia esta inversión se realiza a nivel nacional, por lo cual es necesario diferenciar el porcentaje de dicha inversión destinada a los seis corredores y distribuir el valor obtenido entre cada uno de ellos (Roda, 2009).



En la **Ecuación 1** se muestra la forma de estimar el valor disponible para una clase de intervención:

$$TDIC_{ij} = (IAI) \times (\%AIC) \times PC_i \quad (1)$$

Donde:

- $TDIC_{ij}$ es la tasa de inversión por corredor i en cada clase de intervención j .
- IAI es la inversión anual en infraestructura destinada a los seis corredores. Esta es obtenida a partir del cociente entre la longitud total de los corredores y la longitud total de la red pavimentada en Colombia, multiplicada por el total de la inversión nacional en mantenimiento, establecida por la política pública cada año e incluyendo tanto las partidas de origen público como las privadas.
- $\%AIC$ es el porcentaje anual destinado a un tipo de intervención definido por la política de distribución nacional.
- PC es la proporción de longitud del corredor i en relación con el conjunto de los seis corredores.

El efecto de estas inversiones en cada categoría, en kilómetros, se deduce de la **Ecuación 2** en función de la tasa de inversión para cada clase de intervención j por corredor i ($TDIC_{ij}$), y del costo de la intervención por kilómetro:

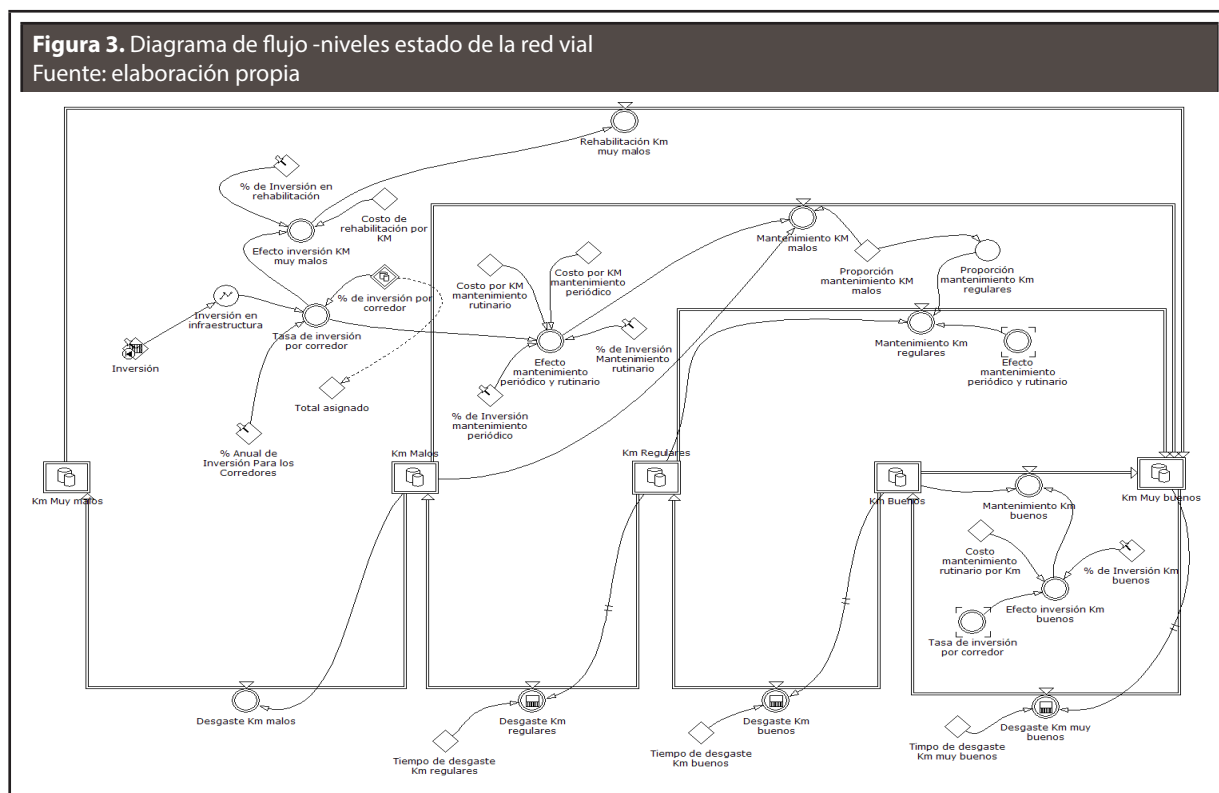
$$Efecto_i = \frac{TDIC_{ij}}{\text{costo/km de intervención}_j} \quad (2)$$

A partir de la **Ecuación 2** es posible delimitar los kilómetros que se pueden intervenir por año y por categoría en función de los recursos económicos disponibles (Universidad Nacional de Colombia, 2014).

En la **Figura 3** se muestra una fracción del diagrama de flujos y niveles elaborado para resolver el modelo.

4. RESULTADOS

El comportamiento obtenido para la simulación de cada uno de los corredores presentes en el caso de estudio se muestra en la **Figura 4** (a. Medellín-Buenaventura, b. Bogotá-Barranquilla, c. Bogotá-Buenaventura, d. Medellín-Bucaramanga, e. Bogotá-Bucaramanga y f. Bogotá-Villavicencio).

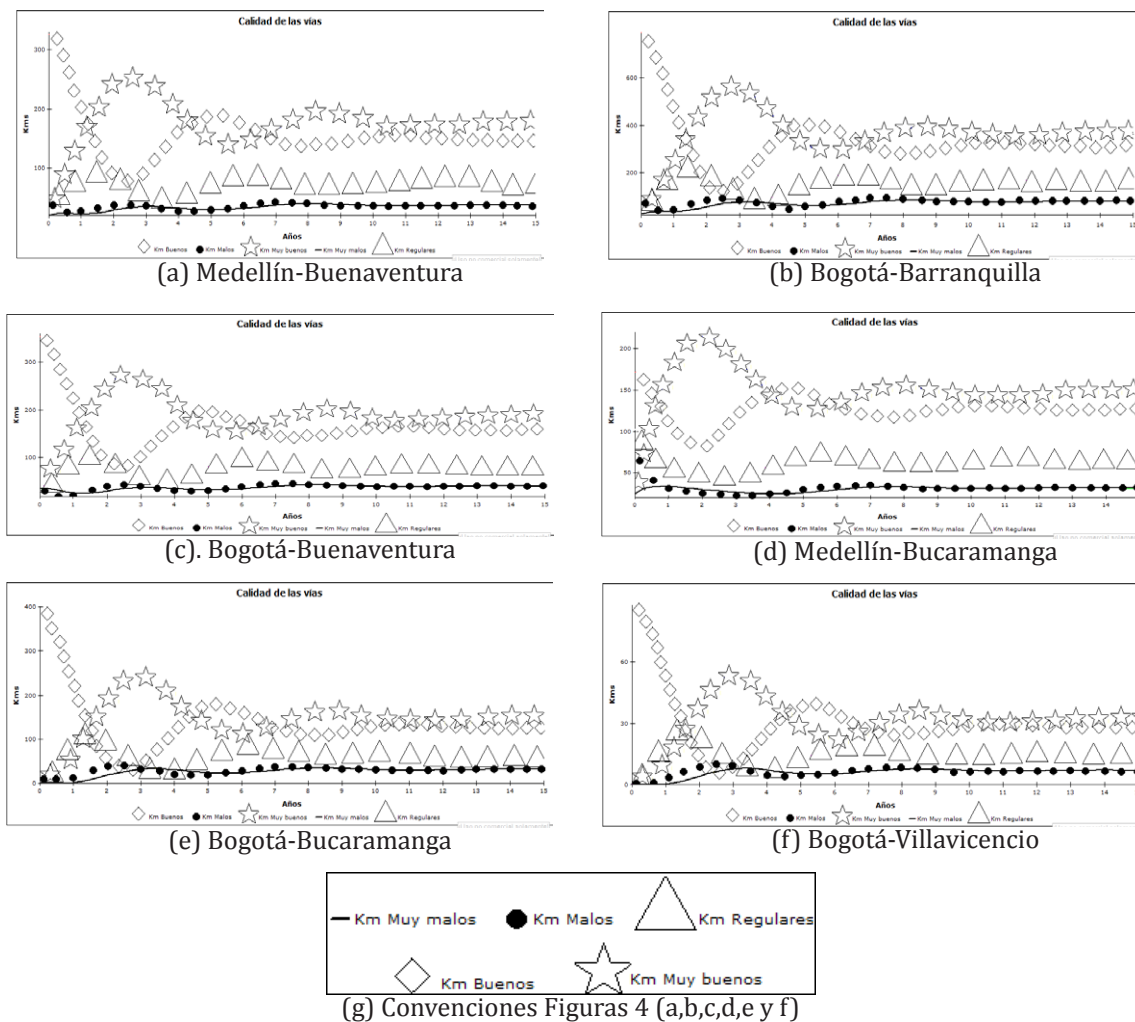


La simulación se realizó utilizando el software Powersim 10.0. Las convenciones para cada una de ellas se encuentran en la **Figura 4 (g)**. En cada una de estas figuras se observa cómo varía el comportamiento de kilómetros Muy Malos, kilómetros Malos, kilómetros Regulares, kilómetros Buenos y kilómetros Muy Buenos a lo largo de los 15 años utilizados para la simulación, observándose que los valores de cada una de estas clasificaciones tienden a estabilizarse con el paso del tiempo.

Debido a que las condiciones actuales (características del corredor) y las inversiones (montos

establecidos) destinadas a cada uno de los corredores es diferente, los valores para los tipos de los kilómetros de la clasificación de calidad son diferentes en cada uno de los corredores. En la **Figura 4** se observa cómo en los seis corredores los kilómetros muy buenos y buenos son los que predominan (mayores cantidades de estos kilómetros). Sin embargo los kilómetros malos y muy malos no llegan a cero, lo que sería ideal, debido justamente al incremento de los flujos de transporte y a la falta de inversiones planificadas para contrarrestar este aumento del transporte.

Figura 4. Comportamiento simulado de los corredores logísticos
Fuente: Elaboración propia

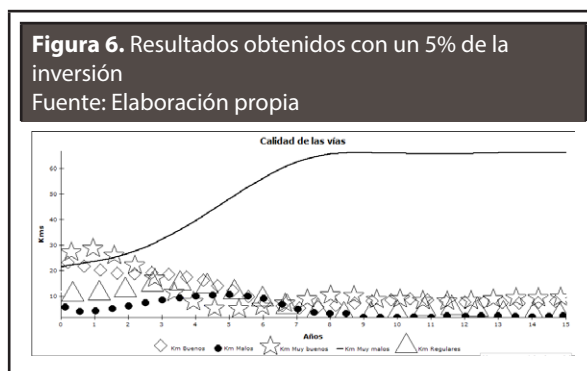
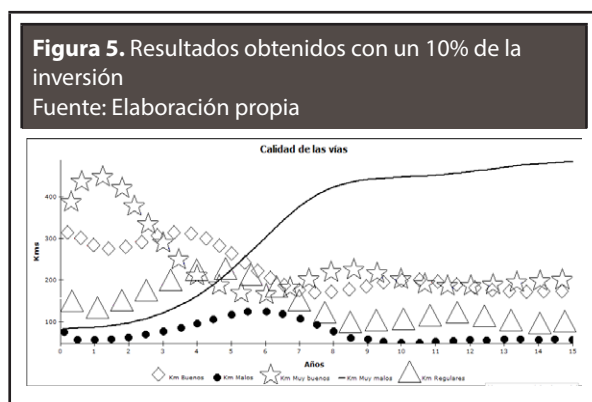


Particularmente para los kilómetros muy buenos, al analizar el comportamiento de esta categoría en cada uno de los seis corredores, se observa un aumento transitorio con una tendencia a estabilizarse a un nivel ligeramente superior al actual, debido a las inversiones anuales que se realizan en cada uno de los diferentes tipos de intervención con el nivel de inversión.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para evaluar la consistencia del modelo ante cambios en los parámetros clave del mismo, se realiza un análisis de sensibilidad en el cual se analizan el efecto de modificar la inversión en infraestructura frente a la calidad de las vías (Santa-Catalina, 2010).

La fracción estimada de la inversión nacional para mantenimiento, destinada a los corredores logísticos estudiados, fue originalmente de 32%. Para evaluar la sensibilidad numérica del modelo se decidió establecer un rango entre 5% a 10% del valor original en cada corredor logístico. En las Figuras 5 y 6 se aprecian los resultados para el corredor Bogotá-Barranquilla, donde se puede observar que con dichos valores de inversión el número de kilómetros de mala calidad predomina en el corredor a lo largo del tiempo, lo cual es más notable cuando la inversión en el corredor es de tan solo del 5% (Figura 6).



Las Figuras anteriores permiten observar un comportamiento sensible al porcentaje de inversión, puesto que los recursos no son suficientes para realizar las intervenciones necesarias, de manera que los kilómetros Muy Malos aumentan a una mayor tasa que el resto de las categorías. Se evidencia también que el modelo produce resultados coherentes a pesar de la drasticidad en el cambio del valor en el parámetro usado.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un modelo que permite mediante la Dinámica de Sistemas evaluar la calidad de las vías de un corredor logístico a partir de variables clave como la inversión en mantenimiento de la red y su uso promedio. A partir de este modelo se puede evaluar el efecto de la política pública de las inversiones en la infraestructura vial en Colombia.

Teniendo en cuenta los resultados, se concluye que tanto la tasa de inversión por corredor como el porcentaje de este que se destina para el mantenimiento son factores determinantes para el funcionamiento óptimo de un corredor logístico.

De los resultados obtenidos se concluye que bajo los supuestos establecidos el comportamiento de estado de la red vial de los seis corredores logísticos tiende en forma asintótica a una ligera mayoría en kilómetros Buenos y kilómetros Muy Buenos, es decir, que tengan un IRI inferior o igual a 3,5.

Sin embargo, es notable que la tendencia asintótica esperada con los supuestos establecidos en el modelo descrito en este artículo tiende a mantener

una calidad regular y mala, que en conjunto ascienden a 32% del total de los kilómetros del corredor Bogotá–Barranquilla y 45% del corredor Bogotá–Bucaramanga, lo que indica una evidente necesidad de mejorar la inversión en mantenimiento a nivel de política pública nacional.

Al analizar la sensibilidad de los datos de inversión en el modelo, se encuentra que una disminución en los valores (recursos económicos) genera que en los corredores se produzca un mayor porcentaje en kilómetros de calidad regular y malos, lo cual se relaciona directamente con unas especificaciones dominantes y de difícil recuperación a kilómetros con calidad buena y muy buena en años futuros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS y al Ministerio de Transporte por apoyar la investigación que ha dado origen a este artículo a través de la Convocatoria 603 de 2012. El proyecto, del cual ha surgido este artículo como resultado de investigación, lleva por título “Estudio del sistema logístico de carga en los principales corredores de Colombia - E-TRANSCOL”, identificado con el código 111860337707 de Colciencias.

REFERENCIAS

- Álvarez, C.; Pabón, C.; Ortiz, J.F. (2010). Logística en Colombia: camino hacia la competitividad. (2), *Revista Económica Supuestos*, pp. 9-11.
- Arnold, J. (2006). *Best Practices in Management of International Trade Corridors*. Washington D.C., U.S.A.: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. [Online]. Disponible en: http://www.mcli.co.za/mcli-web/downloads/docs/Best_Practices_in_Management_of_International_Trade_Corridors.pdf
- Arriaga, M.C.; Garnica, P.; Rico, A. (1998). *Índice Internacional de Rugosidad en la Red de Carretera de México*. San Fandila, México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- Arvis, J.F.; Raballand, G.; Marteau, J.F. (2010). *The Cost of Being Landlocked: Logistics Costs and Supply Chain Reliability*. Washington D.C., U.S.A.: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. [Online]. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/2489/558370PUB0cost1C0disclosed071221101.pdf?sequence=1>
- Bowersox, D.; Closs, D.; Cooper, M. B. (2008). *Supply Chain Logistics Management*. 1st Edition. New York City, USA: McGraw-Hill Companies.
- Chopra, S.; Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, Planeación y operación*. 3rd edition. México: Pearson Education.
- Departamento Nacional de Planeación. (2008). Conpes 3547. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/CONPES/DocumentosConpes/ConpesEcon%C3%B3micos/2008.aspx>
- Departamento Nacional de Planeación. (2013). Conpes 3779. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=ivBnvXIY6ao%3D&tabid=1656>
- Fedesarrollo (2013). *Indicadores del sector transporte en Colombia*. Bogotá, Colombia: Fedesarrollo. [Online]. Disponible en: <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/Indicadores-del-sector-transporte-en-Colombia-Informe-Consolidado.pdf> Última visita: mayo de 2016.
- Hjorth, P.; Bagheri, A. (2006). Navigating Towards Sustainable Development: A System Dynamics Approach. *Futures*, 38(1), February, pp. 74-92.
- Holling, C. S.; Meffe, G. K. (1996). Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management. *Conservation Biology*, 10(2), March, pp. 328-337.
- INVIAS (2013). *Estado de la Red Vial*. [Online]. Disponible en: <http://www.invias.gov.co/index.php/red-vial-nacional/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>. Última visita: Mayo de 2016.
- Kirkwood, C. W. (1998). *System Dynamics Methods: A Quick Introduction*. Tempe, Arizona: Arizona State University.
- Kunaka, C.; Carruthers, R. (2014). *Trade and Transport Corridor Management Toolkit*. Washington D.C., U.S.A.: The World Bank.
- Muñuzuri, J.; Grosso, R.; Cortes, P.; Guadix, J. (2011). Development of a Cost Model for Intermodal Transport in Spain. España [Online]. Disponible en: Available at: <http://www.intechopen.com/books/supply-chain->

- management-new-perspectives/development-of-a-cost-model-for-intermodal-transport-in-spain
- National Research Council. (2000). *Highway Capacity Manual*. [Online]. Disponible en: http://www.gsw-ventcenter.com/Draft_SEIR_References%5C2000_TRB.pdf
- OCDE; CAF; CEPAL. (2013). *Perspectivas económicas de América Latina 2014: logística y competitividad para el desarrollo*. [pdf] Santiago de Chile, Chile: CEPAL. [Online]. Disponible en: http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/cendes/Perspectivaseconomicas2014.pdf
- Pascua J.M.; Gento, A.M. (2010). Implicaciones socioeconómicas del desarrollo de infraestructuras logísticas en Castilla y León. *4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XIV/Congreso de Ingeniería de Organización*. San Sebastián, Spain. September 8th-10th.
- Richmond, B. (1993). Systems Thinking: Critical Thinking Skills for the 1990s and Beyond. *System Dynamics Review*, 9(2), pp. 113-133.
- Roda, P. (2009). Evaluación ex-post del Programa Integral de Rehabilitación y Mantenimiento Vial y cuantificación del Pasivo Vial de la Red Vial Nacional., Bogotá: s.n.
- Rushton, A.; Croucher, P.; Baker, P. (2006). *The Handbook of Logistics and Distribution Management*. 3rd edition. London: Kogan Page.
- Santa-Catalina, I.M. (2010). *Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria*. PhD. Universidad del País Vasco.
- Schaffernicht, M. (2012). Aplicación del análisis de sistemas a las ciudades y al transporte público urbano. Santiago de Chile: Cepal- Colección Documentos de proyectos.
- Sterman, J. (2002). *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division. [Online]. Disponible en: <https://esd.mit.edu/WPS/internal-symposium/esd-wp-2003-01.13.pdf>
- Universidad Nacional de Colombia (2014). Documento E-TRANSCOL #10. Definición de un sistema de indicadores para el monitoreo del Sistema Logístico Nacional. Informe Investigación, Proyecto E-transcol, código 111860337707 CONCIENCIAS.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Gómez Lizarazo, J.A.; Serna Urán, C.A.; Arango Serna, M.D. (2016). Modelo de evaluación dinámica de la calidad en la infraestructura vial de corredores logísticos en Colombia. *Revista EIA*, 13(25), enero-junio, pp. 135-145. [Online]. Disponible en: DOI: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2016.13.25.135-145>