



## **VI Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial**

Lima (Perú) – 16, 17 y 18 de Octubre de 2018

---

Título del trabajo: METODOLOGÍAS NUEVAS Y EFICIENTES PARA LA MODELACIÓN DE LA SEGURIDAD VIAL APLICADAS EN PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO.

Tema (Pilar del Plan Mundial): EJE 1 - GESTIÓN DE LA SEGURIDAD VIAL

Autor/a: Víctor G Valencia-Alaix

Empresa / Institución: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

Cargo: Profesor

Dirección: Calle 65 N°78-28. Bloque M, oficina 117. Facultad de Minas. Medellín, Colombia.

Email: [vgvalenc@unal.edu.co](mailto:vgvalenc@unal.edu.co)

Teléfono: +57-4255165/+57-425152.



## **RESUMEN:**

La inseguridad vial es un problema que desean los países resolver para reducir los costos económicos y sociales que genera.

Los datos de colisiones provienen de los Informes Policiales de Accidentes de Tránsito que en Colombia han sido analizadas con procedimientos estadísticos descriptivos que son limitados para describir la complejidad de la seguridad vial impidiendo entenderla y restringiendo la generación de alternativas de solución satisfactorias.

En los países desarrollados el análisis de las bases de datos de colisiones se ha hecho con metodologías modernas y sofisticadas con gran capacidad de representar los efectos en la seguridad vial de los factores contribuyentes permitiendo considerar esta complejidad mediante el desarrollo de modelos de seguridad vial basados en análisis multivariado permitiendo generar políticas o medidas de mejoramiento efectivas.

Este trabajo describe estas metodologías y muestra su aplicación en dos casos de Medellín, siendo la primera vez que se utilizan en una ciudad de un país en vías de desarrollo, permitiendo modelar la seguridad vial para comprenderla. En el primer caso se analizaron variables clásicas y macroeconómicas con un modelo Logit Multinomial (MNL) con parámetros aleatorios y en el segundo se analizaron los atropellos con un modelo macroscópico espacial. Los resultados muestran el potencial de estas metodologías para representar la seguridad vial, poder entenderla y generar alternativas de solución satisfactorias y eficientes.

**PALABRAS CLAVE (5):** Modelos de seguridad vial, Logit Multinomial, macroscópico espacial, Informe de accidentes



## 1 INTRODUCCIÓN

La inseguridad vial es un problema que los países desean mitigar debido a los grandes costos económicos y sociales que genera; según la WHO (2015) los datos sugieren que los fallecidos y heridos en las vías de los países con ingresos bajos y medios se estima causan pérdidas económicas hasta del 5% del Producto Interno Bruto.

El Instituto de Medicina legal y Ciencias Forense de Colombia (2017) concluyó que en 2016 resultaron 6925 víctimas fatales en accidentes de tránsito siendo el valor más alto en la historia reciente donde se ha mostrado una tendencia creciente. Es así, que para el 2016 las muertes de accidentes de transporte se incrementaron en 5,75 % con respecto al 2015, a su vez 27,63 % con respecto al 2010. Este panorama de incrementos de las fatalidades por accidentes de transporte, sigue alejando el país de la meta del decenio de acción para la seguridad vial 2011-2020.

Cerca del 83 % de las muertes y heridos en Colombia se concentran en los denominados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2013) “usuarios vulnerables de la vía pública”, compuesto por los peatones (25,51 % de las muertes), usuarios de bicicleta (5,21 % de las muertes) y los ocupantes de motos (51,50 % de las muertes) de acuerdo con Medicina legal y Ciencias Forense de Colombia (2017).

En términos de muertes por 100.000 habitantes, Colombia para el año 2016 contaba con una tasa de 14,93 muertes; comparado con cifras internacionales el país presentaba una tasa de mortalidad ubicada entre la tasa de la región europea (9,3) y muy cercana a la tasa de la región de las Américas (15,9) (WHO, 2015).

Se destaca en Colombia un problema de inseguridad vial mayoritariamente urbano. En 2010 la mortalidad en zonas urbanas alcanzaba cifras cercanas a 63 % de participación porcentual, en el año 2015 el porcentaje alcanza el 57 % (4.131 casos).

## 2 PROBLEMÁTICA

El problema de la seguridad vial es un tema muy complejo considerando, en el medio terrestre, la gran diversidad de los modos de transporte que participan, la intervención de los factores contribuyentes en la ocurrencia de las colisiones, la magnitud, la disparidad de los componentes, las responsabilidades no definidas de las instituciones actoras, entre otras. (CFPV, 2013)

Muestra de esta complejidad la da Treat et al (1979) en un estudio realizado en el condado de Monroe en Indiana (EEUU) donde encontró la participación de tres categorías de factores que contribuyen a la ocurrencia de las colisiones: el humano, vehículo y el medio ambiente. Estos fueron valorados con técnicas precisas y personal especializado hallándose que los factores humanos fueron los más frecuentemente citados como causas de los accidentes seguido por el medio ambiente, que incluyó la vía, y finalmente el vehículo. De acuerdo con el equipo de



análisis detallado de los datos registrados en el estudio, los factores humanos fueron identificados como la causa de los accidentes entre un 70,7 % y 92,6%, los ambientales entre 12,4% y 33,8% y los factores vehiculares estuvieron identificados entre un 4,5% a 12,6%. Ver Figura 1.

Por lo tanto, resulta un gran reto poder entender y analizar el grado de interacción de estos factores que contribuyen a la ocurrencia de las colisiones para proponer políticas y medidas de mejoramiento de la seguridad vial. Para lograr esto es fundamental disponer de datos de colisiones y otra información con calidad; de manera que se pueda proceder con las etapas de análisis.

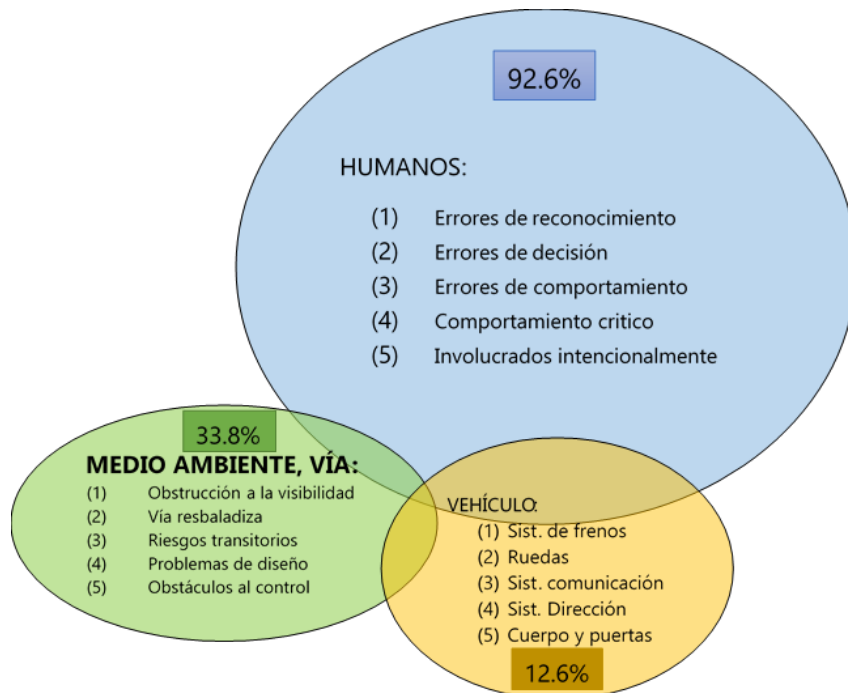


Figura 1 factores contribuyentes de los accidentes según Treat et al (1979).

El tipo de análisis que se realiza en nuestro medio es un tratamiento con la estadística descriptiva sobre algunas variables de manera separada para describir su comportamiento mediante medidas de tendencia central, resumen, medidas de posición no central, medidas de dispersión, frecuencias para ser representado a través de gráficos, líneas, diagramas, etc. Algunos análisis incursionan en el uso de la estadística inferencial considerando distribuciones de probabilidades de una variable.

Estos procedimientos estadísticos sobre las bases de datos de accidentes se realizan sin mucha profundidad limitando la capacidad de describir la gran complejidad del fenómeno de la



ocurrencia de colisiones y la severidad de las lesiones resultante; se restringe el conocimiento de la interacción de los factores impidiendo determinar la causa del problema y por lo tanto restringiendo la generación de alternativas de solución del problema de la seguridad vial.

El objeto de este trabajo es presentar metodologías nuevas y eficientes para el análisis de los datos de seguridad vial y mostrar casos de su aplicación en el ámbito de una ciudad latinoamericana.

### 3 DATOS DE COLISIONES

Según la CFPV (2013) considera los siguientes tipos de bases de datos de accidentes.

**Epidemiológicas:** Son aquellas que toman la información luego de ocurrido el accidente; tiene las ventajas de ser reales y que permite calcular los riesgos, pero tiene muy poca información sobre la causa de los accidentes al basarse en conclusiones de los testigos e investigadores de accidentes, además, produce respuestas después del accidente en vez de anticiparlos. Ejemplo de estos son los provenientes de los Informes Policiales de Accidentes.

**Simulación:** Se obtiene con el uso de equipos y software de simulación del ámbito para un conductor con la ventaja de reproducir muchas situaciones, pero se cuestiona que se puede alejar de la realidad.

**Experimentos (estímulos):** Son empíricas y por tanto la representación de la realidad es limitada y cuestionable.

**Naturalísticas:** Los datos se obtienen de una muestra de vehículos con conductores y en vías reales instrumentados para recolectar información durante el viaje sobre el comportamiento de los conductores, la operación del vehículo y las condiciones de la vía durante un periodo relativamente largo de tiempo permitiendo obtener información real de los fenómenos de seguridad vial.

#### 3.1 Informe Policial de Accidentes de Tránsito (IPAT)

Para el registro de los accidentes en Colombia se utiliza el Informe Policial de Accidentes de Tránsito que mediante la Resolución N° 0011268 de 2012 (Ministerio de Transporte, 2012) da las instrucciones precisas de llenar el formato cuando ocurre un accidente y que es registrado por la Policía Nacional o mediante agentes de tránsito vinculados a instituciones públicas como las Secretaría de Movilidad o de Tránsito y de Transporte de algunos municipios.

El IPAT puede contener al menos 130 datos de cada accidente relacionados con las características de los vehículos involucrados, sus ocupantes, de las vías, del lugar del suceso, víctimas resultantes y otra información complementaria entre la que se destaca la causa



hipotética del accidente seleccionada de una lista codificada según criterio del policía o agente que haya levantado la información.

Bases de datos de esta fuente son muy utilizadas en los análisis y puede obtenerse amplia explicación de los fenómenos de seguridad en la medida que sean de buena calidad y las metodologías incorporen el análisis multivariado como los métodos que se presentan en este documento.

#### 4 ANÁLISIS DE DATOS

Las nuevas metodologías abordan asuntos complejos de acuerdo a Mannering y Bhat (2014). Tienen el potencial de expandir significativamente el entendimiento de los muchos factores que afectan la probabilidad y severidad (en términos de heridas personales) de las colisiones en las vías. Esto a su vez puede llevar a medidas de mejoramiento de la seguridad más efectivas que pueden reducir sustancialmente las fatalidades y heridos en las vías.

En los países desarrollados la mayoría de los estudios de accidentes viales han extraído sus datos de los Informes Policiales de Accidentes. Con estos informes se puede estimar la frecuencia de los accidentes en lugares específicos y la severidad de los heridos asociada a los ocupantes de los vehículos y otros involucrados.

La Tabla 1 lista los enfoques metodológicos en orden cronológico según como aparecieron en la literatura de investigación de accidentes para los análisis de frecuencia y de severidad de lesión en colisiones.

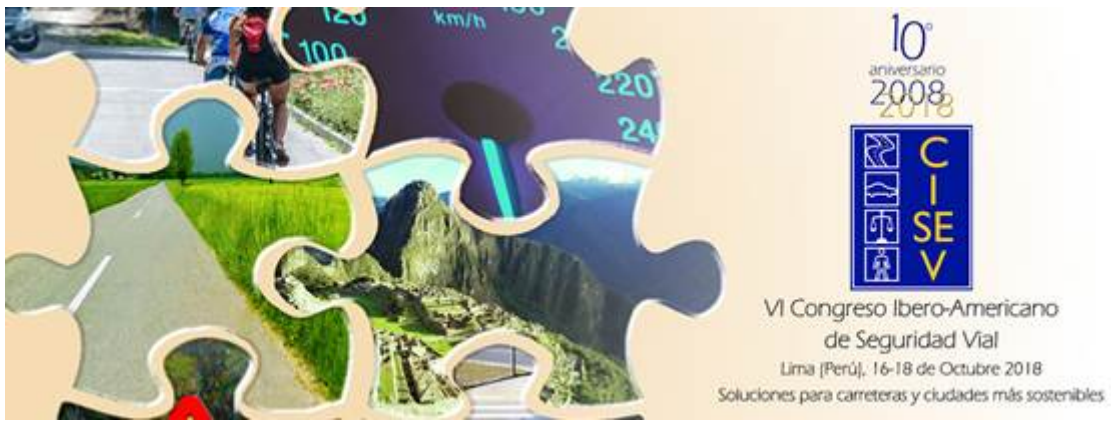
El éxito de estas investigaciones, al describir de manera muy completa los problemas de la seguridad vial y su interacción con muchos factores contribuyentes, ha llevado a crear modelos de seguridad vial que a su vez han constituido herramientas y procedimientos para predecir las colisiones con una aproximación bastante buena suficiente para ayudar en los procesos de diseño de infraestructuras seguras.



Tabla 1 Enfoques metodológicos en la investigación de la seguridad vial (Mannering y Bhat, 2014).

| Tipo de modelo de seguridad vial                            | Enfoque metodológico   |
|---|--|
| Analizando datos de frecuencia de colisiones                | Poisson regression model   |
|   | Negative binomial/Poisson–gamma models                             |
|   | Duration models  |
|   | Bivariate/multivariate models <sup>1</sup>                         |
|   | Zero-inflated Poisson and negative binomial models                 |
|   | Random effects models, spatial and temporal correlation models     |
|   | Generalized estimating equation models                             |
|   | Neural network, Bayesian Neural network, and Vector machine models |
|   | Hierarchical/multilevel models                                     |
|   | Negative multinomial model   |
|   | Poisson-lognormal and Poisson–Weibull models                       |
|   | Gamma model  |
|   | Conway–Maxwell–Poisson model                                       |
|   | Censored regression models   |
|   | Generalized additive models  |
|   | Random parameters count models                                     |
|   | Finite-mixture/latent-class and Markov switching models            |
| Negative binomial-Lindley model                             |  |
| Count model recast as a generalized ordered-response system |  |
| Analizando datos de severidad de lesión en colisiones       | Binary logit/probit models   |
|   | Multinomial logit models   |
|   | Nested logit models  |
|   | Sequential logit/probit models                                     |
|   | Heteroskedastic ordered logit/probit models                        |
|   | Ordered logit/probit models  |
|   | Log-linear models  |
|   | Generalized ordered outcome models                                 |
|   | Simultaneous binary logit model                                    |
|   | Bivariate/multivariate binary probit models                        |
|   | Bivariate/multivariate ordered probit models                       |
|   | Artificial neural networks   |
|   | Mixed joint binary ordered logit model                             |
|   | Mixed logit model (random parameters logit model)                  |
|   | Partial proportional odds model                                    |
|   | Finite-mixture/latent-class and Markov switching models            |
|   | Heterogeneous outcome model  |
| Mixed ordered probit (random parameters probit) model       |  |
| Spatial and temporal correlations                           |  |

1: Modelos de frecuencia y severidad de lesión en colisiones simultáneos.



Es el caso para Estados Unidos de América del Highway Safety Manual-HSM (AASHTO, 2010) que es una herramienta analítica y técnica para cuantificar los efectos potenciales en las colisiones como resultado de decisiones tomadas en las etapas de planificación, diseño, operación y mantenimiento de un proyecto vial; por lo tanto, es un recurso que provee conocimiento sobre seguridad y es herramientas que facilita la toma de decisiones para el mejoramiento de la infraestructura vial basadas en el comportamiento de la seguridad. El HSM provee metodologías para la medición, estimación y evaluación de vías en términos de frecuencia y severidad de las lesiones en las colisiones.

## 5 CASOS DE EJEMPLO

A manera de ejemplo de aplicación de estas metodologías se presentan dos casos para Medellín que podrían ser de interés para desarrollar un campo de investigación que significaría mucha ayuda en el conocimiento de la seguridad vial.

En las dos investigaciones de utilizó la Base de Datos de Colisiones de Medellín (BDCM) entre los años 2009 a 2016 conteniendo los datos provenientes del IPAT. La BDCM ofrece un potencial enorme para entender los factores detrás del número y severidad de accidentes; cuenta con información de la vía, vehículos, y personas involucradas en 357.696 accidentes, 616.538 vehículos y 226.211 personas.

### 5.1 Influencia de las condiciones socioeconómicas en la severidad de las lesiones de colisiones en área urbana para un país en vías de desarrollo.

Según Mesa-Arango et al (2018) se decidió analizar la “Probabilidad de severidad de colisiones” mediante un modelo Logit Multinomial (MNL) con parámetros aleatorios según la Ecuación (1).

$$U_{ni} = \beta'X_{ni} + \varepsilon_{ni}, \forall i \in I, \forall n \in N \quad (1)$$

Donde:

$U_{ni}$  es la desutilidad de un accidente  $n \in N$  sufriendo el tipo de severidad mayor  $i \in I$ , donde  $I$  es el conjunto de tipos de severidad, y  $N$  la base de datos de colisiones.

$X_{ni}$  es un vector de variables específica de la colisión,  $\beta$  es un vector de parámetros estimables, y  $\varepsilon_{ni}$  un término aleatorio (iid de valor extremo).

La probabilidad  $L_{ni}(\beta)$  de sufrir un accidente de severidad  $i$  en el contexto  $n$  condicionado a los parámetros  $\beta$  se muestra en la Ecuación (2).

$$L_{ni}(\beta) = \frac{e^{\beta'X_{ni}}}{\sum_{j \in I} e^{\beta'X_{nj}}}, \forall i \in I, \forall n \in N \quad (2)$$





Con el análisis crítico de los resultados se definen relaciones causales que configuran la representación integral del fenómeno de seguridad vial, además, se interpretan para definir un enfoque econométrico del modelo de seguridad vial.

Se presentan los resultados del modelo para Severidad de Lesiones en Colisiones (CIS) considerando Solo Daños Materiales (PDO) y Resultados con Lesionado y Fatal (IFO). Las variables del modelo final son significativas y tienen signos intuitivos.

Algunas interpretaciones de los resultados por categoría de resultados son:

#### Geometría de la vía y Control de Tránsito

- El parámetro para colisiones en intersecciones es aleatorio. Aumenta la probabilidad de un IFO en 1.45%. Los efectos aleatorios indican que el 74.43% de las observaciones tienen aumentos y el 25.57% disminuciones de IFO.
  - Los Semáforos disminuyen la probabilidad de IFO en 2.90%. Ya que están provistos para guiar y controlar el tránsito adecuadamente, minimizan la ambigüedad del conductor y por ello reduce las condiciones negativas para el IFO.

#### Atributos por tipo de colisión

- Condiciones ambientales
  - Las colisiones en áreas residenciales tienden a ser más severas que aquellos en áreas industriales/comerciales. En promedio, la probabilidad de un IFO aumenta en 3.08% en áreas residenciales.

#### Indicadores macroeconómicos

- El parámetro PIB per cápita es aleatorio. En promedio, un incremento de 1000 en el PIB/cápita reduce la probabilidad de IFO en 4.85%. Los efectos aleatorios indican que el 23.36% de las colisiones tiene aumentos de IFO, y que el 76.64% reducciones de IFO.

#### Recomendaciones para mejorar el CIS:

- Priorizar el mejoramiento de las intersecciones a control con semáforos puede reducir la probabilidad de IFO. Especialmente si son adecuadamente coordinadas con mejoras en capacidad y niveles de servicio.
- Ya que las algunas buenas condiciones de la vía (pavimento seco, buena iluminación y sin lluvia/niebla/viento) aumenta el CIS, es importante incorporar el criterio perdonador en el diseño de vías nuevas para mejorar la movilidad y mitigar CIS con productos válidos (barreras de seguridad longitudinales, amortiguadores de impacto, demarcaciones, entre otros).
- La caída de ocupante del vehículo provee una aproximación al impacto negativo de las colisiones de motociclistas/ciclistas en el CIS. Se debe proveer mejores



condiciones de la vía para estos usuarios para mitigar su CIS, por ejemplo, vías solo para motociclistas/ciclistas, segregación adecuada del tránsito mixto, entre otros.

## 5.2 Análisis macroscópico espacial de atropello de peatones

Los atropellos representan menos del 4%; sin embargo, involucran más del 12% del número de las fatalidades del tránsito entre 2009 y 2016. Las colisiones con peatones no están distribuidas de manera homogénea.

Según las características de la BDCM convino usar modelos agregados, es decir, agregación de datos de colisiones en regiones específicas.

Se obtuvieron de la BDCM los atropellos de peatones en el periodo de 2009-2016. Se detectaron 13.075 atropellos y luego de su geocodificación fue posible recuperar la localización de 12.273.

En su ubicación se usaron las Zonas de Análisis de Tránsito Urbano de Medellín (TAZ).

La valoración del riesgo involucró la exposición considerando el número de peatones atropellados normalizados la población por TAZ.

Variable respuesta: Numero de peatones atropellados por 1000 personas en cada TAZ.

Luego del análisis de las posibles variables se determinaron las siguientes categorías:

- Variables sociodemográficas (Relación de Hombres y Mujeres, Estado socioeconómico)
- Variables del uso de la tierra (residencial, comercial, servicio y áreas verdes)
- Clasificación de vías (proporción de vías locales, colectoras, arterias principales, arterias secundarias, y autopistas)
- Variables de infraestructura (longitud y anchura de andenes, carreteras, pendiente de vía, intersecciones semaforizadas, inventario de ciclorrutas)
- Variables de transporte (longitud de rutas de transporte público, estacionamiento de taxis, estacionamientos)

La estrategia de especificación contó con los siguientes pasos del enfoque clásico para econometría espacial:

1. Estimar un modelo sin variable retrasada espacialmente – OLS

$$y = X\beta + \varepsilon$$

2. Prueba si la dependencia espacial sustantiva está presente debido a:

Modelo espacial retrasado (Spatial lag model)  $y = \rho W y + X\beta + \mu$

Modelo con error AR espacial (Spatial AR error model)  $y = X\beta + I - \lambda W - 1\varepsilon$



Donde:

y es la variable dependiente; X son las variables explicatorias;  $\varepsilon$  es el vector de errores;  $\beta$  son los parámetros del modelo; W es una matriz de vecindad estandarizada por filas;  $\rho$  y  $\lambda$  son parámetros autorregresivos escalares.

Los resultados principales en resumen fueron:

En la regresión de mínimos cuadrados ordinaria (OLS) todas las variables son significativas con un intervalo de confianza del 85%.

Pero realizado el diagnóstico de la dependencia espacial se consideró el Estadístico I de Moran: 0.3422 (valor-p 2.2e-13) que indica mala especificación del modelo.

Basado en el enfoque clásico propuesto por Anselin & Rey (2014) la prueba del Multiplicador de Lagrange respalda estimar un modelo espacial retrasado.

Por lo que se estimó un modelo Espacial Retrasado (Spatial Lag model) que fue estimado vía mínimos cuadrados espaciales de dos etapas S2SLS. Los errores estándar utilizando varianzas ajustadas por White para la heterocedasticidad.

Las interpretaciones de algunos resultados se discuten a continuación:

- Las Zonas con el Ingreso más alto tienen a tener menor número de peatones atropellados ya que tienen un mayor uso extensivo del vehículo particular.
- Las áreas residenciales tienden a reducir el riesgo de colisiones vehículo y peatón mientras que las áreas comerciales aumentan el riesgo de colisión.
- Los estacionamientos tienden a aumentar el número de peatones atropellados ya que los conductores tienen que caminar para completar el propósito de viaje.
- La tendencia de los buses de parar por solicitud de los usuarios sin paradas definidas a lo largo de la ruta aumenta el atropello de peatones.
- El estacionamiento de los taxis reducen la probabilidad de atropellos. El viaje en taxi cubre el viaje completo de origen a destino reduciendo la exposición a caminar.

## 6 CONCLUSIONES

- El uso de las metodologías presentadas permite comprender las relaciones causales entre las consecuencias de las colisiones y los factores contribuyentes a ellas de una manera bastante detallada que permite plantear políticas y media de mejoramiento de la seguridad vial.



- La eficiencia y efectividad de las políticas y medidas de mejoramiento de la seguridad vial en los países desarrollados está estrechamente relacionada con la aplicación de las metodologías presentadas en este trabajo de manera continua y estructurada.
- Es fundamental para la mejor comprensión de los problemas de la seguridad vial además de uso de las metodologías en cuestión la utilización de bases de datos de calidad sobresaliente.
- Los casos de aplicación de las metodologías para el caso de una ciudad latinoamericana muestran que son convenientes principalmente por su gran potencial de revelar las relaciones causales de las condiciones particulares de estos países reflejadas en las variables que se usen y las consecuencias de las colisiones que se desean mitigar. Por tanto, resulta ser un camino prometedor para enfrentar este grave problema social.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). Highway Safety Manual. 1st edition, Volume 1. Washington, D.C.,

Corporación para el Fondo de Prevención Vial (2013). Cátedra Nacional de Seguridad Vial. Santafé de Bogotá, D.C. Noviembre.

Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (2017) FORENSIS 2016 DATOS PARA LA VIDA. Primera Edición. ISBN 2145-0250. Imprenta Nacional. Bogotá, D. C., República de Colombia. Junio.

Lizarazo, C. and V. Valencia. Macroscopic Spatial Analysis of Pedestrian Crashes in Medellin, Colombia. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1177/0361198118758639>.

Mannering, F., Bhat, C., 2014. Analytic methods in accident research: methodological frontier and future directions. Analytic Methods in Accident Research 1, 1–22.

Mesa-Arango, R., V. G. Valencia-Alaix, R. A. Pineda-Méndez, and T. Eissa. Influence of Socioeconomic Conditions on Crash Injury Severity for an Urban Area in a Developing Country. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2018, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1177/0361198118758684>

Ministerio de Transporte (2012). Resolución N° 0011268 de 2012. Santafé de Bogotá, D.C. Diciembre.

Organización Mundial de la Salud. Informe sobre la situación mundial de seguridad vial 2013. Ginebra, Suiza: OMS, 2013.



Savolainen, P., Mannering, F., Lord, D., Quddus, M., 2011. The statistical analysis of highway crash-injury severities: a review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis and Prevention*. 43(5), 1666–1676.

Treat, J.R., et al. (1979). *Tri-level study of the causes of traffic accident: Final Report*. Institute of Research in Public Safety, Indiana University. Bloomington, Indiana. 328 pp.

World Health Organization (2015). *Global status report on road safety 2015*. ISBN 978 92 4 156506. Geneva, Switzerland.

World Health Organization (2011). *Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020*. Switzerland. Consultado el 5 de abril de 2018 en: [http://www.who.int/roadsafety/decade\\_of\\_action/plan/en/](http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/en/)