

Propuesta de un índice de seguridad de cruces peatonales para la Ciudad de México: Reporte Final de Investigación

Febrero 2018

Jorge Alberto Montejano Escamilla¹, Ruth Pérez López², Luz Yasmín Viramontes Fabela³, Camilo Caudillo Cos², María de los Dolores Sánchez Castañeda², Amílcar Morales Gama², Mario Ledesma Arreola² y Tonatiuh Suárez Meaney⁴

¹Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial,A.C, (CentroGeo), Ciudad de México.

²Universidad Autónoma Metropolitana unidad Cuajimalpa, Ciudad de México.

³CAMINA. Centro de Estudios de Movilidad Peatonal, A.C., Ciudad de México.

⁴Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

AGRADECIMIENTOS. Se agradece la colaboración de Gerardo Escalona, Alejandra Leal, Sonia Medina, Xavier Treviño y Yonatan Ortiz así como de la Dirección General de Ingeniería de la Subsecretaría de Control de Tránsito de la Secretaría de Seguridad Pública.

FINANCIACIÓN. Esta investigación fue realizada con financiamiento de la Embajada de Francia en México y de la Fundación Mapfre, España.

CONFLICTOS DE INTERÉS. Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

AUTORES

Jorge Alberto Montejano Escamilla

Doctor en Urbanismo por la Universitat Politècnica de Catalunya

Investigador del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C., (CentroGeo).

Responsabilidades dentro del equipo: Coordinación General.

Jorge Alberto Montejano Escamilla es Dr. en Urbanismo por la Universitat Politècnica de Catalunya (Tesis Excelente Cum-Laude) y Arquitecto por la Universidad Iberoamericana. Actualmente es Profesor-Investigador titular “C” y Coordinador de Proyectos en el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A.C. (CENTROGEO). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores S.N.I. nivel I; miembro de número de la Asociación Mexicana de Urbanistas (AMU), y miembro de la Red de Estudios de la Forma Urbana (REFU).

jmontejano@centrogeo.edu.mx

Ruth Pérez López

Doctora en Cambio Social por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia.

Catedrática Conacyt, comisionada a la UAM Cuajimalpa

Responsabilidades dentro del equipo: Coordinación general del estudio; revisión del estado del arte; identificación, jerarquización y selección de criterios; determinación de los rangos de valor de los criterios y ponderación de los mismos mediante la técnica AHP (consulta a expertos); coordinación de la encuesta a peatones (N=1000); observación y análisis de comportamientos peatonales *in situ*; coordinación del trabajo de campo; diseño del índice; redacción del artículo.

Ha sido investigadora del Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos (2011-2015), investigadora invitada del Institut National d'Études Démographiques de París (sept-nov.2015) y postdoctorante de la Universidad Nacional Autónoma de México (2007-2008). Entre 2008 y 2011, participó en la Coordinación Académica del Observatorio Ciudadano de la Ciudad de México (UAM-C), en donde coordinó la construcción, revisión y alimentación de indicadores en temas de cultura ciudadana, seguridad pública, derechos humanos y medio. En el ámbito docente, ha sido profesora visitante “Titular C” de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Lerma (2016-2017) y profesora de la asignatura de sociología urbana en la Maestría en Proyectos para el Desarrollo Urbano (MPDU) de la Universidad Iberoamericana (2012-2016). Actualmente es Investigadora Nacional Nivel I por el S.N.I y Catedrática Conacyt comisionada al Laboratorio de Ciudades en Transición de la UAM Cuajimalpa.

rperezl@conacyt.mx

Camilo Alberto Caudillo Cos

Maestro en Geomática por el Centro de Investigación en Ciencias de la Información Geoespacial, A.C., (CentroGeo).

Centro de Investigación en Ciencias de la Información Geoespacial, A.C., (CentroGeo).

Responsabilidades dentro del equipo: Análisis estadístico, reportes de investigación sobre la relación entre los componentes del Índice y hechos de tránsito bajo los enfoques de modelos inflados por cerros y árboles de decisión.

Camilo Caudillo es actualmente candidato a Doctor en Geomática por el CentroGeo, donde es Profesor Investigador Asociado e imparte cursos de análisis espacial en el diplomado de Análisis de Información Geoespacial y la Maestría de Planeación Espacial. Ha publicado recientemente artículos sobre segregación residencial, forma urbana, vivienda deshabitada en la Ciudad de México, la relación entre el entorno construido y el comportamiento de viajes, por mencionar algunos. A lo largo de su trayectoria ha participado en diversos proyectos de vinculación que abordan diversos fenómenos urbanos como: geografía del crimen y seguridad pública, migración de capital humano altamente capacitado, movilidad laboral en la ciudad de México. Camilo obtuvo el grado de Maestro en Estudios de Población por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO-México) así como el grado de Maestro en Geomática por el CentroGeo.

ccaudillo@centrogeo.edu.mx

Luz Yazmin Viramontes Fabela

Arquitecta graduada Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM)

Directora General, CAMINA Centro de Estudios de Movilidad Peatonal A.C.

Responsabilidades dentro del equipo: Revisión del estado del arte; identificación, jerarquización y selección de criterios; determinación de los rangos de valor de los criterios; análisis de campo.

Arquitecta graduada del Tecnológico de Monterrey campus Monterrey, con intercambio en la Universidad de los Andes, Colombia. Ha cursado los diplomados "Urbanismo Social en Medellín: Procesos urbanos, ambientales y sociales" (Universidad EAFIT) "Accesibilidad Universal y Diseño para todos: Estrategias de Intervención en Arquitectura y Planificación Urbana" (Universidad de Barcelona). Es creadora del "1er Foro Internacional de Ciudades Incluyentes" en la Ciudad de México. Participó como consultora en proyectos sociales y participación ciudadana con jóvenes en el estado de Querétaro, México. Fue Coordinadora del Programa de Diseño de Calles y consultora

para el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo (ITDP México), donde realizó asesoramiento a los gobiernos locales para la implementación de proyectos de movilidad activa como: intersecciones seguras, infraestructura peatonal y ciclista. Como parte del equipo de ITDP coordinó el proyecto del “Manual de calles: diseño vial para ciudades mexicanas” de SEDATU financiado por el BID. Ha sido reconocida con el “Walking Visionaries Award” en el Walk21 en Viena y ha liderado la participación del “Manual de urbanismo táctico Camina_kit” representando a México en la Bienal de Arquitectura de Venecia 2016. Actualmente, es Directora General de CAMINA. Centro de Estudios de Movilidad Peatonal A.C.

yazmin@camina.mx

María de los Dolores Sánchez Castañeda

Doctora en Estadística por la Universidad de Kent, Reino Unido

Profesora de asignatura del Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM)

Responsabilidades dentro del equipo: Diseño muestral y análisis de datos.

Ha sido investigadora en el Centro de Investigación en Geografía y Geomática (2014-2017), en el Centro de Investigación en Matemáticas (2012-2014), profesora investigadora en el Centro de Investigación en Ingeniería Industrial del Tecnológico de Monterrey (2009-2011), asistente de profesor en la Universidad de Kent (2005-2008). También ha sido ejecutiva de estadística en Nielsen México (2000-2002) a cargo del diseño y estimación de la Muestra Maestra para estimación de universos de tiendas detallistas y en Farell Actuarios como Actuarial Consultora en valuaciones actuariales y seguros. En la actualidad es profesora de asignatura en Probabilidad en el ITAM y de Estadística Bayesiana en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

doloreslullaby@gmail.com

Tonatiuh Suárez Meaney

Licenciado en Criminología por la Academia Internacional de Formación en Ciencias Forenses.

Responsabilidades dentro del equipo: Geolocalización; asesoría para modelaje espacial, Modelaje con mapas axiales

Es licenciado en Diseño de los Asentamientos Humanos por la UAM y en Criminología por la Academia Internacional de Formación en Ciencias Forenses. Es candidato a Maestro en Urbanismo por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Actualmente es profesor de geoestadística en la carrera de Geoinformática de la Universidad Autónoma del Estado de México y gerente de modelación en la empresa Geoestrategias Electrónicas de Mercado, SA de CV. Ha

participado en más de 600 proyectos de geoestadística aplicada, geomarketing y cartografía numérica.

tonatiuhsmeaney@gmail.com

Tabla de Contenido

1. Introducción	9
2. Objetivos	9
3. Materiales y Metodología	10
4. Resultados	31
5. Discusión	48
6. Conclusiones.....	50
7. Referencias Bibliográficas	51
8. Trabajo actual de difusión de Resultados	53

Resumen

El Índice de Seguridad de Cruces Peatonales (ISCP) es una herramienta que permite evaluar aspectos de calidad y seguridad de los cruces peatonales ubicados sobre vialidades primarias en Ciudad de México. Ante la ausencia de un instrumento de este tipo en México y la falta de homologación de la normativa en materia de diseño de cruceiros en la capital del país, se decidió desarrollar un índice que permitiera no solamente evaluar los cruces peatonales, sino también estandarizar los criterios de diseño de los mismos. En Ciudad de México, a pesar de que las colisiones de vehículos con peatones representan tan solo 4.1% del total de los accidentes de tránsito, estos últimos contabilizan más de la mitad (51.3%) de las víctimas mortales. Por otra parte, debido a las mayores velocidades permitidas sobre las vialidades primarias, los peatones corren más riesgo de morir atropellados sobre este tipo de vías que sobre vialidades secundarias. Estos datos muestran la urgencia de contar con una herramienta de evaluación que permita medir la calidad infraestructural de los entornos peatonales en las ciudades mexicanas con criterios referidos a estándares internacionales y contextualizados en México, así como mejorar el diseño, infraestructura y operación de los cruces para disminuir las tasas de siniestralidad y mortalidad vial.

Abstract

The Crosswalk Safety Index is a tool aimed to assess quality and safety issues of primary road crosswalks in Mexico City. Due to the absence of that kind of evaluating tools in Mexico and due to a lack of homogenization of the design rules of crosswalks along the country, an index was developed not just to assess the crosswalks, but to set design standards. Even though fatalities from pedestrian-motor vehicle collision in Mexico City are just 4.1% of overall transit accidents, these account for more than half (51.3%) of fatalities. Furthermore, pedestrians have more risk to die in a pedestrian-motor vehicle collision within primary roads than in secondary ones due to higher speed limits. The data highlights the urgent need for having an assessment tool that allow to measure infrastructure quality around and within the crosswalks, harmonized along international standards but contextualized for Mexico, to improve design, infrastructure and operation of crosswalks in order to reduce observed fatality rates.

1. Introducción

Los accidentes de tránsito terrestre constituyen una de las externalidades negativas de gran impacto derivadas del transporte motorizado y asociadas al uso intensivo del automóvil. En México, los siniestros viales (hechos de tránsito) se han convertido en un grave e importante problema de salud pública ya que de acuerdo con la Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes, hasta hace poco representaban la primera causa de muerte en niños de 5 a 14 años de edad y la segunda en jóvenes de 15 a 29 (CONAPRA, 2013). Para contextualizar la problemática, basta mencionar que hacia 2011 se registraron 16,615 personas fallecidas y 162,029 lesionadas por hechos de tránsito. Datos más recientes de la Secretaría de Salud (SS, 2017), señalan que hacia 2015, morían diariamente 21 personas atropelladas en México. De acuerdo con un documento titulado *La Seguridad Vial en las Américas* elaborado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2016: 8), México se encuentra en el lugar 23 de 31 que conforman este grupo de países (siendo el mayor el que menos tasa de accidentes por cada mil habitantes tiene). A pesar de que en zonas urbanas y suburbanas las colisiones de vehículos con peatones representan tan solo 4.1% del total los hechos de tránsito, los transeúntes contabilizan 24.3% de las víctimas fatales a nivel nacional y 51.3% en Ciudad de México (INEGI, 2014). Según datos de la Secretaría de Seguridad Pública (SSP), en Ciudad de México 6 de cada 10 atropellamientos ocurre en ejes viales, avenidas principales y vías de acceso controlado aun cuando éstas representan solo 11% de la red vial total (GDF 2015: 15). Esto parece ser corroborado por Richards (2010), quien argumenta que está demostrado que existe una alta correlación positiva entre los muertos por atropellamiento y las velocidades automotoras. También ha sido confirmado por diversas instituciones, como la *Insurance Institute for Highway Safety* (IIHS, 2000), quienes agregan que tanto la velocidad como la edad del peatón son determinantes en los resultados de los hechos de tránsito (sin importar la edad, los peatones envueltos en accidentes de tránsito tienen más probabilidades de morir al aumentar la velocidad vehicular y, en hechos de tránsito a cualquier velocidad, los peatones de edad avanzada tienen más chance de morir en el evento).

2. Objetivos

Dado lo anterior, el presente trabajo tuvo por objetivo proponer un índice de seguridad de cruces peatonales (ISCP) situados sobre las intersecciones de las vialidades primarias en México, con la doble intención tanto de mejorar las condiciones de cruce así como coadyuvar a reducir la siniestralidad. Dado que la escala de observación es el cruce peatonal —considerado como un espacio señalizado en una vía de circulación y una zona de espera situada en ambos lados de una banqueta—, para este trabajo se evaluaron los cruces peatonales con semáforo vehicular situados sobre vialidades primarias en Ciudad de México. El cruce de calle representa el mayor obstáculo

para las personas que se desplazan por la ciudad caminando, y este es el espacio en donde el peatón corre el mayor riesgo de ser atropellado. El índice que se presenta a continuación, plantea los criterios mínimos que se deben de tomar en cuenta al diseñar un cruce, para garantizar entornos peatonales de calidad que permitan caminar de forma segura, eficiente y cómoda.

Si bien existen diferentes índices con estas características en nivel internacional, México no cuenta con un índice de este tipo. La falta de normatividad en materia de diseño de cruces peatonales reflejada en los programas “Cruces Seguros” y “Pasos Seguros” llevados a cabo recientemente (2014-2016) en Ciudad de México por la Agencia de Gestión Urbana (AGU) y la Autoridad del Espacio Público (AEP) respectivamente, nos muestra la urgencia de estandarizar los criterios de diseño de cruces. A pesar de este vacío, se reconoce el interés creciente del gobierno local por el tema de la seguridad vial. La Ley de Movilidad y el Programa Integral de Movilidad publicados en 2014, el nuevo reglamento de tránsito que establece nuevos límites de velocidad, la estrategia “Visión 0 Accidentes” adoptada por el gobierno a principios de 2016 y el Programa Integral de Seguridad Vial publicado en 2017, nos pone frente a un contexto favorable para el uso aplicado de esta investigación. El índice que proponemos a continuación pretende ser una herramienta práctica y fácilmente aplicable que pueda convertirse en un instrumento útil para las autoridades públicas.

3. Materiales y Metodología

Antecedentes metodológicos

Actualmente, existen dos grandes tendencias metodológicas para la generación de índices de seguridad en cruces peatonales: a) las que parten de la observación, conocimiento experto y se sirven de estadística descriptiva (i.e. Cheng *et al.*, 2014; Bian *et al.*, 2013; Carter *et al.*, 2006) y b) las que toman como base conocimiento experto modelándolo principalmente mediante técnicas de análisis multicriterio (i.e. Basile *et al.*, 2010; Montella *et al.*, 2010).

Entre los índices que parten de observación y se sirven de estadística descriptiva (a), destaca el estudio de Carter *et al.* (2006) “*Pedestrian and Bicycle Intersection Safety Indices*”. El objetivo de este trabajo es desarrollar índices que permitan a planeadores e ingenieros priorizar proactivamente cruces peatonales con respecto a la seguridad peatonal y ciclista. Para lograr su objetivo, los autores desarrollan un método de recolección de datos en campo para generar valores de indicadores. Tanto el PED ISI (*Pedestrian Intersection Safety Index*) como el Bike ISI, son índices contruidos con base en la opinión de expertos sobre el grado de seguridad de los cruces e intersecciones seleccionados. El proceso permitió generar ratings de seguridad y estudiar las interacciones entre conductores de vehículos motorizados, peatones y ciclistas. Para el PED ISI, los autores analizaron 68 cruces peatonales semaforizados y no semaforizados de tres ciudades estadounidenses, seleccionados a partir de diferentes criterios como el volumen de peatones y el número de accidentes de hechos de

tránsito, entre otros. Se realizaron videos en estos cruces, los cuales fueron revisados y evaluados por expertos que prestaron especial atención en los conflictos entre los diferentes actores y en las maniobras evasivas. Una vez revisados, se generó una clasificación jerárquica de los cruces con base en la percepción del nivel de seguridad que tenían los expertos. Los evaluadores puntuaron los cruces en una escala del 1 al 6 de acuerdo a su sensación de seguridad y confort. Estos ratings sirvieron de base para la ulterior creación del índice final. Para reducir la lista inicial de variables de estudio en los cruceros (12 variables) y hacer más eficiente la recolección de datos en campo, se utilizaron modelos de regresión lineal para determinar su significancia estadística. De los modelos de regresión, las variables significativas se redujeron a seis (presencia de semáforo; señal de alto; número de carriles; velocidad automotora; volumen de tráfico; uso de suelo predominante), las cuales fueron retenidas en el modelo final PED ISI. El coeficiente de Pearson alcanzado con su modelo fue $R^2=0.83$. Destaca de este trabajo la importancia de considerar el tipo de uso de suelo predominante (en su caso, el uso comercial significaba mayor riesgo para peatones) y que este método esté pensado para detectar a priori cruces peligrosos en términos de accidentalidad para una evaluación posterior en profundidad. Un hándicap de este método es la necesidad de registrar la velocidad de los vehículos automotores, valor que puede no ser tan sencillo de recabar en campo.

Métodos similares a éste han sido desarrollados con posterioridad. Bian *et al.* (2013) desarrollaron un método para determinar el Nivel de Servicio (NS) para intersecciones no semaforizadas. Primero identificaron los factores primarios que influyen la sensación de seguridad y confort de los peatones en intersecciones, basados en trabajos previos e integrando las condiciones locales; posteriormente recolectaron datos en tiempo real de 459 participantes en 11 cruces típicos en China relativos al entorno de la intersección y a las características de los factores potenciales; en tercera instancia utilizaron modelos analíticos de correlación de Pearson y de regresión 'step-wise' para generar el NS; finalmente desarrollaron el modelo de NS para la mayor parte de los cruces chinos sin semáforos. Por medio de correlaciones de Pearson y análisis factorial, se determinaron las variables más significativas, desechando algunas por mostrar colinealidad con las variables más fuertemente correlacionadas; se probó la configuración de cada variable y finalmente se establecieron los coeficientes de las variables resultantes en el mejor ajuste de la regresión.

Por su parte, Cheng *et al.* (2014) desarrollaron un Índice de Conflicto de Seguridad (SCI, Safety Conflict Index por sus siglas en inglés) para el contexto chino, con un enfoque en la evaluación directa —basada en el conflicto de tráfico— y no en la evaluación indirecta —basada en accidentes de tránsito—. La recolección de datos se realizó mediante filmaciones en vídeo en tres intersecciones señalizadas con semáforo (6 horas de vídeo en dos días consecutivos de la semana). El modelado estadístico se basó en la detección de conflictos (i.e. desaceleración peatonal o detención para esquivar un vehículo; aceleración peatonal para esquivar el vehículo; aceleración del vehículo para esquivar al peatón, etcétera.) sobre los que se condujo una regresión lineal, obteniendo una ecuación final con sus respectivos coeficientes.

Por otro lado, entre los índices que toman como base el conocimiento experto modelándolo mediante técnicas de análisis multicriterio (b), encontramos el de Montella y Mauriello (2010) quienes parten de la identificación de problemas en los cruces y no del número de fatalidades. El objetivo es similar a los anteriores: identificar cruces de alto riesgo, jerarquizarlos en función de su peligrosidad e identificar elementos de seguridad. Este método fue aplicado en 51 cruces y su principal aporte fue servir de lista de verificación de variables que influyen en la seguridad del cruce: “se formula combinando dos componentes de riesgo: la exposición de usuarios a peligros en el camino y la probabilidad de verse involucrados en un accidente” (p. 10). Hasta donde se puede observar, no se provee ningún mecanismo de validación o calibración del modelo de probabilidades.

Cafiso *et al.* (2010) optan por la técnica de “conflicto de tráfico” para desarrollar su *Pedestrian Risk Index*, el cual “representa una aproximación eficiente como estrategia preventiva”. El índice fue desarrollado como una “medida sustituta de seguridad vial”, usando indicadores cercanos a accidentes basados en medidas de proximidad espacial y temporal de usuarios de vialidades. Su índice se basa tanto en la duración como en la severidad del conflicto entre vehículos y personas. Dado que este modelo es del tipo “si... entonces”, se probó en un cruce analizando las condiciones previas a su mejoramiento y posteriores a las medidas correctivas. Como es un modelo que utiliza datos de tiempo real (i.e. tiempo de colisión, tiempo de colisión con el peatón, tiempo de frenado del vehículo), esta técnica requiere de una tecnología de video para extraer los datos y generar el índice, lo que no lo hace muy asequible.

A pesar de sus diferencias metodológicas, ambas corrientes coinciden en que se deben generar índices de seguridad sin partir de datos geoespaciales de accidentalidad, dado que —argumentan—, generalmente existe un problema con la consistencia y calidad de los datos de accidentes (Cafiso *et al.*, 2010) y porque los accidentes de peatones con un vehículo automotor comúnmente son tan esparcidos que rara vez existe una alta iteración en un cruce específico (Carter *et al.* 2006; Basile *et al.* 2010).

Propuesta metodológica

Partiendo del marco metodológico de Basile *et al.* (2010), desarrollamos el Índice de Seguridad de Cruces Peatonales (ISCP) en cinco grandes fases: i) identificación, jerarquización y selección de los criterios; ii) determinación de los rangos de valor de los criterios y ponderación de los mismos mediante la técnica AHP (Analytic Hierarchic Process); iii) prueba del instrumento en campo; iv) diseño de muestra, levantamiento del instrumento en campo y cálculo del ISCP y v) confrontación del ISCP con datos de atropellamientos de SSP-2010-2016.

(i) Identificación, jerarquización y selección de los criterios

Primero, para la selección de los criterios, se realizó una revisión del estado del arte (cerca de 53 documentos) de la cual se identificaron un total de 94 criterios que se jerarquizaron en función de la frecuencia de menciones en la bibliografía consultada. Posteriormente, se contrastaron estos criterios con los resultados de un trabajo de campo realizado previamente (Pérez, 2015), durante el cual se llevaron a cabo grabaciones de vídeo en seis cruces de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y se aplicó una encuesta no probabilística a 1000 peatones con la finalidad de indagar en el sentimiento de seguridad y la percepción de riesgo de las personas al cruzar la calle. Los cruces fueron seleccionados en función de su nivel de diseño y equipamiento (existencia o no de paso de cebra, de obstáculos físicos, de rampas, etcétera), y de su localización en la ciudad. Esto permitió observar y analizar el comportamiento de los peatones en condiciones desiguales y en entornos más o menos favorables a los desplazamientos a pie. Al presentar características diversas, las vialidades y avenidas seleccionadas presentan diferentes grados de complejidad al momento de cruzarlas. En cada cruce, se instalaron dos cámaras de video de un lado y otro de la avenida, dirigidas hacia los flujos peatonales, y se grabó durante una hora en condiciones de mucho tránsito vehicular, y otra hora en condiciones de poco tránsito vehicular. En una etapa posterior, se visualizaron los videos e identificaron los factores que conllevaron a un conflicto entre los peatones y los conductores de vehículos motorizados y los sucesos que hubieran podido ocasionar una colisión. Por otra parte, se capturaron en una base de datos todos los movimientos peatonales durante las doce horas de grabación, en función de diferentes variables como el nombre del cruce, el horario de grabación, el sexo y la condición de los peatones (mujer, hombre, adulto mayor hombre, adulto mayor mujer y niño/niña), el tiempo de espera antes de cruzar, la hora a la que el peatón empezó a cruzar la calle y si cruzó caminando o corriendo. En total se registró el comportamiento de 4,482 peatones. Posteriormente se aplicó la encuesta en los seis cruces seleccionados, en función de cuotas de sexo y durante los mismos horarios en los que se grabaron los videos.

Con base en los resultados de la encuesta, se muestran los principales motivos por los cuales los peatones se sienten inseguros al cruzar la calle y el criterio asociado a cada motivo que decidimos integrar en el índice (cuadro 1). Para la construcción del ISCP, se tomaron en cuenta la mayor parte de los motivos a excepción de aquellos relacionados con la violación del reglamento de tránsito (ej. “los vehículos se pasan el alto” y “los autos se paran encima del paso peatonal”).

Por otra parte, con base en la visualización y análisis de las grabaciones, se observó un gran número de conflictos entre vehículos y peatones, destacándose conductores que no ceden el paso, la presencia de obstáculos móviles y semi-fijos que disminuyen la accesibilidad y la visibilidad en los cruces y la existencia de carriles de contraflujo que reducen la legibilidad y seguridad del cruce. Con base en lo anterior, se vio la necesidad de incluir los criterios 8, 11 y 17 (cuadro 3) en el índice final.

Cuadro 1. Principales motivos por los cuales los peatones se sienten inseguros al cruzar la calle

Motivos	Porcentaje	Criterios
Los vehículos no dan el paso	25.7	Vuelta a la derecha/izquierda
Los vehículos van demasiado rápido	22.1	Semáforo peatonal
No funciona el semáforo	8.3	Semáforo peatonal
No hay semáforo	8	Semáforo peatonal
Los vehículos se pasan el alto	7.3	No se seleccionó ningún criterio
El semáforo no da tiempo para cruzar	6.5	Tiempo de cruce
Hay desorden del transporte público	4.3	Obstáculos móviles
No hay paso de cebra	2.5	Paso de cebra
Vuelta a la derecha	1.7	Vuelta a la derecha/izquierda
El Metrobús es peligroso	1.4	Carril de contraflujo
Los vehículos se paran encima del paso peatonal	1	No se seleccionó ningún criterio
Falta de visibilidad	0.4	Obstáculos que obstruyen la vista

Fuente: elaboración propia.

Por último, y después de una retroalimentación de los criterios por parte de expertos, obtuvimos una lista final de 19 criterios ordenados en los cinco macro-criterios siguientes:

Accesibilidad: se refiere a la calidad del pavimento en el área de espera peatonal y en el área de cruce peatonal, las cuales deben de permitir al peatón desplazarse por una superficie lisa, antiderrapante, sin grietas, agujeros o cambios de nivel. Además, estas áreas deben de estar libres de obstáculos fijos y móviles como postes de luz, postes de semáforos, casetas telefónicas, puestos de comercio informal, carritos de comida, botes de basura, registros destapados, anuncios, paradas de autobús y/o de taxis, árboles, macetas, excedentes de material sobre el piso, entre otros (figura 1). Los peatones deben poder desplazarse sin tener que rodear obstáculos o correr el riesgo de caerse, tropezarse o resbalarse. Por último, este macro-criterio también hace referencia a la accesibilidad universal: el cruce debe disponer de pavimento táctil y de una señal audible o vibratoria que permita a las personas con discapacidad visual cruzar de forma segura.

Figura 1. Accesibilidad: obstáculos diversos que obstruyen el paso



Fuente: Ruth Pérez

Visibilidad: este macro-criterio busca medir la visibilidad diurna y nocturna en el cruce. La visibilidad diurna está relacionada con los obstáculos permanentes o móviles que se encuentran sobre la banqueta, en el área de espera y/o en el área de cruce y que disminuyen la visibilidad de los peatones en los cruces y/o dificultan a los peatones ver a los vehículos (figura 2). La visibilidad nocturna tiene que ver con la correcta iluminación de los cruces durante la noche.

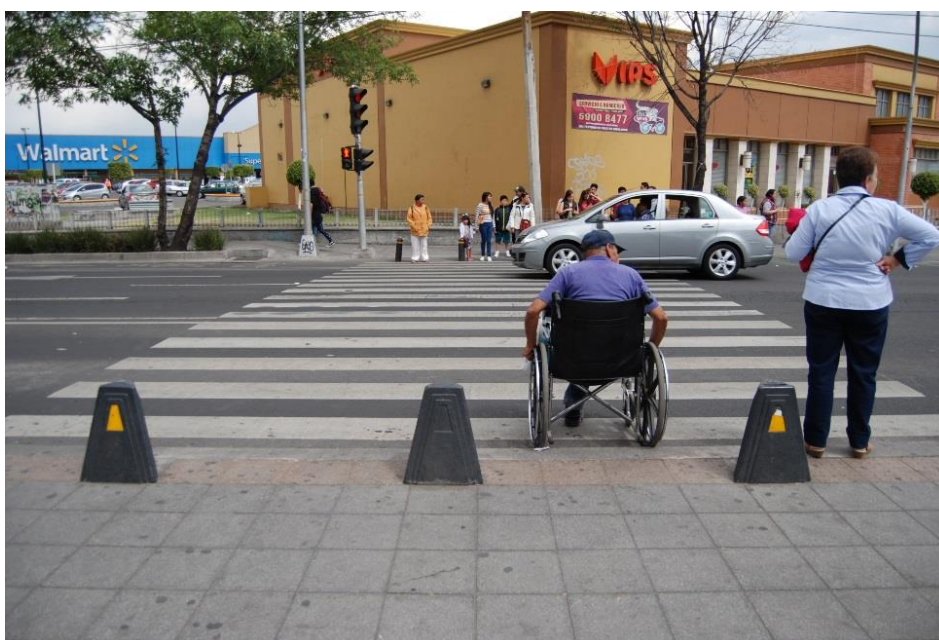
Figura 2. Visibilidad: obstáculo (poste) que obstruye la vista



Fuente: Ruth Pérez

Diseño: el diseño del cruce debe de incluir una rampa recta, con abanico o alabeo en ambas esquinas y en la isleta o el camellón (en caso de existir). Estas rampas deben de estar alineadas y deben de ser accesibles para las personas con discapacidad (figura 3), por lo que tendrán un máximo del 6% de pendiente. Este macro-criterio también busca medir la distancia de cruce y el tiempo de exposición del peatón sobre el arroyo vehicular (a mayor tiempo de exposición, mayor riesgo de ser atropellado), así como la presencia de un carril de contraflujo que disminuye la legibilidad del cruce y causa incertidumbre e inseguridad al momento de cruzar la calle.

Figura 3. Diseño: rampa lateral



Fuente: Ruth Pérez

Señalamiento horizontal: aquí se mide la legibilidad del cruce, obtenida a través de diferentes marcas visibles sobre el pavimento: el paso de cebra (figura 4), las flechas de sentido sobre el pavimento que permiten saber de qué lado vienen los vehículos y la línea de alto antes del paso peatonal, la cual señala al conductor en donde detenerse.

Figura 4. Señalamiento horizontal: paso de cebra poco visible



Fuente: Ruth Pérez

Semaforización: aquí se evalúan diferentes elementos de operación del cruce, como el tiempo que tienen que esperar los peatones antes de poder cruzar la calle (a mayor tiempo de espera, mayor toma de riesgos) el tiempo suficiente de cruce, la presencia de semáforos peatonales y vehiculares que estén bien ubicados y en funcionamiento y la existencia de un ciclo semafórico que permita al peatón cruzar la vialidad sin que los vehículos tengan permitido dar la vuelta a la derecha o a la izquierda (figura 5).

Figura 5. Semaforización: vuelta a la derecha no regulada por un semáforo



Fuente: Ruth Pérez

Todos los macro-criterios seleccionados incluyen elementos de diseño, infraestructura y operación del cruce y dejan de lado elementos externos al cruce como aquellos relacionados con los flujos peatonales y vehiculares, la velocidad o el volumen de los vehículos, debido a la imposibilidad de incidir en ellos.

(ii) Determinación de rangos de valor y ponderación de criterios

Los rangos de valor de cada criterio se presentan en el cuadro 3. Existen dos tipos de valores: cualitativos (ej. calidad de la banqueta en zona de espera, condición de la iluminación) y cuantitativos (ej. distancia de cruce, tiempo de espera antes de cruzar). Algunos de los rangos de valor emanaron del Manual Técnico de Accesibilidad de Seduvi (2007), de índices internacionales y de la opinión de expertos, quienes apoyaron en la tarea de definir lo que inevitablemente es arbitrario y subjetivo. Para poder compararlos entre sí, todos los valores posibles se normalizaron para variar entre 0 y 1, siendo los valores cercanos a 0 valores negativos y cercanos a 1 valores los positivos.

Para la generación del índice, se optó por la utilización de la metodología del Proceso Analítico Jerárquico o AHP (*Analytic Hierarchic Process*), diseñada por el matemático Saaty hacia los años setenta, el cual se define como una aproximación a la toma de decisiones multi-atributo basadas en el concepto de comparaciones por pares 'pairwise comparisons' (Malczewski, 1999). Este método permite ponderar criterios (por expertos o por un grupo de personas que conozcan sobre los propios criterios) en diferentes niveles para conformar un valor final, el cual se convertirá en el valor del propio índice. Una ventaja atribuible a este método, es que la ponderación parte del conocimiento experto e impide, mediante diversas pruebas como la razón de inconsistencia, respuestas incongruentes con respecto al universo de preguntas. El modelo aquí desarrollado plantea tres niveles jerárquicos en un sentido vertical (figura 6). Entonces, de acuerdo con el método AHP, en caso de una estructura jerárquica con tres niveles definido por J criterios, M macro criterios y una meta, es necesario evaluar el peso de los valores asociados a un macro criterio, y el peso general del macro criterio que contribuye a la meta general (el índice de seguridad).

Así, el índice de Seguridad ISCP estará determinado por la siguiente ecuación:

$$ISCP = \sum_m w_m \times \sum_j (w_j^m \times A_j) \quad (1)$$

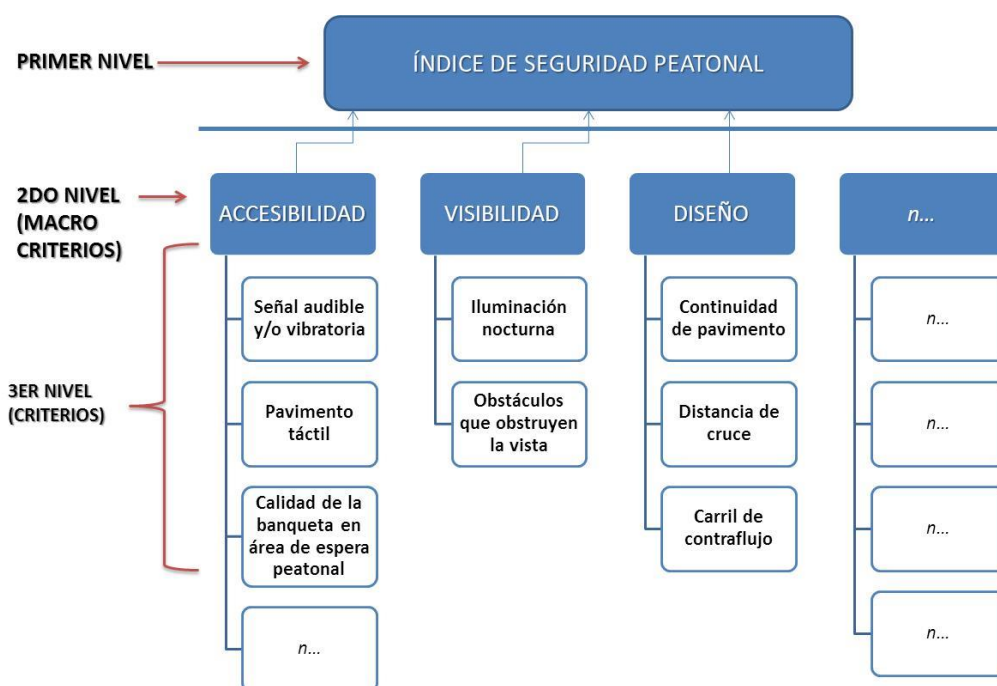
Donde:

w_j^m es el peso del criterio general de A_j asociado a un macro criterio general C_m ;

w_m es el peso del macro criterio general C_m que contribuye a la meta general.

La ponderación de cada criterio se realiza con base en la escala semántica de valor propuesta por Saaty (2008) que varía del 1 al 9, comparando todos los criterios entre ellos. Para la aplicación del método, se invitaron a diez expertos, entre los cuales se encontraron funcionarios de la Secretaría de Movilidad, de la Secretaría de Seguridad Pública, de la Autoridad del Espacio Público y de la Agencia de Gestión Urbana, investigadores, consultores independientes y miembros de organizaciones no gubernamentales. Cada participante llevó a cabo el ejercicio a través de una plataforma AHP en línea¹.

Figura 6. Diagrama esquemático del método AHP



Fuente: elaboración propia con base en Basile *et al.* (2010).

En las siguientes figuras (7, 8) y cuadros (2, 3) pueden apreciarse los resultados de la ponderación de expertos en línea para cada uno de los 19 criterios y para cada uno de los 5 macro criterios. La figura 7 presenta una captura de pantalla de la plataforma AHP en línea, la cual fue configurada para devolver el ISCP. La plataforma automáticamente contrasta la congruencia entre las respuestas a las preguntas, de tal forma que el proceso iterativo no acaba hasta que se alcanza un mínimo de congruencia en los valores (importancia) entre cada criterio.

¹ <http://bpmsg.com/ahp-online-calculator/>

Figura 7. Captura de pantalla de la plataforma AHP en línea

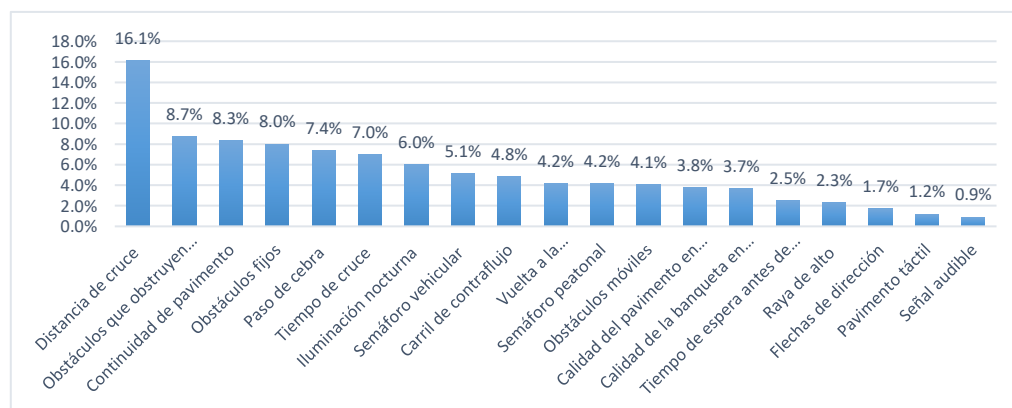
With respect to **Accesibilidad**, which criterion is more important, and how much more on a scale 1 to 9 for **Índice de seguridad peatonal**?

	A - wrt Accesibilidad - or B?	Equal	How much more?
1	☒ Aviso audio/táctil para personas co or ☐ Piso podotáctil para personas con d	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
2	☐ Aviso audio/táctil para personas co or ☒ Buena calidad del pavimento en zona	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
3	☐ Aviso audio/táctil para personas co or ☒ Buena calidad del pavimento sobre a	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
4	☐ Aviso audio/táctil para personas co or ☒ Paso sin obstáculos fijos	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
5	☐ Aviso audio/táctil para personas co or ☒ Paso sin obstáculos móviles	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
6	☐ Piso podotáctil para personas con d or ☒ Buena calidad del pavimento en zona	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☒ 8 ☐ 9
7	☐ Piso podotáctil para personas con d or ☒ Buena calidad del pavimento sobre a	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☒ 8 ☐ 9
8	☐ Piso podotáctil para personas con d or ☒ Paso sin obstáculos fijos	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
9	☐ Piso podotáctil para personas con d or ☒ Paso sin obstáculos móviles	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☒ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
10	☒ Buena calidad del pavimento en zona or ☐ Buena calidad del pavimento sobre a	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
11	☐ Buena calidad del pavimento en zona or ☒ Paso sin obstáculos fijos	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
12	☐ Buena calidad del pavimento en zona or ☒ Paso sin obstáculos móviles	☐ 1	☐ 2 ☒ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
13	☒ Buena calidad del pavimento sobre a or ☐ Paso sin obstáculos fijos	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
14	☒ Buena calidad del pavimento sobre a or ☐ Paso sin obstáculos móviles	☐ 1	☐ 2 ☐ 3 ☒ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9
15	☒ Paso sin obstáculos fijos or ☐ Paso sin obstáculos móviles	☒ 1	☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9

Fuente: Fuente: Captura de pantalla proveniente de <http://bpmsg.com/ahp-online-calculator/>

La plataforma es por sí una herramienta valiosa de análisis porque permite generar gráficos no solo sobre los propios criterios del índice, sino también sobre la razón de consistencia o qué tan consistente fueron las respuestas a una pregunta determinada. Aquí abajo (figura 8) se muestra, por importancia, las variables según opinión de los expertos:

Figura 8. Resultados de la ponderación: prioridades de grupo



Vale la pena adelantar de este primer ejercicio, que la variable *distancia de cruce* fue la que más relevancia tuvo entre los expertos. Como se verá más adelante, este hecho no es fortuito: coincide con una de las variables que más influyen para predecir los hechos de tránsito en los modelos que se presentan al final de esta investigación.

Como resultado de la ponderación de expertos, se generó el siguiente cuadro, con el cual se calculó el ISCP (de manera automática) para cada uno de los cruces muestrados:

Cuadro 2. Ponderación de criterios con base en modelado AHP

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	
Índice de seguridad ISCP 1	ACCESIBILIDAD 0.2169	Señal audible y/o vibratoria	0.0427
		Pavimento táctil	0.0559
		Calidad de la banqueta en área de espera peatonal	0.1689
		Calidad del pavimento en área de cruce peatonal	0.1761
		Obstáculos fijos	0.3678
		Obstáculos móviles	0.1886
	VISIBILIDAD 0.1475	Iluminación nocturna	0.4092
		Obstáculos que obstruyen la vista	0.5908
	DISEÑO 0.2922	Continuidad de pavimento	0.2842
		Distancia de cruce	0.5502
		Carril de contraflujo	0.1656
	SEÑALAMIENTO HORIZONTAL 0.1142	Paso de cebra	0.6464
		Raya de alto	0.2018
		Flechas de dirección	0.1518
	SÉMAFORIZACIÓN 0.2292	Tiempo de espera antes de cruzar	0.1094
		Tiempo de cruce	0.306
		Vuelta a la derecha/izquierda	0.1817
		Semáforo vehicular	0.2219
		Semáforo peatonal	0.1811

Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta el formato de evaluación de cruces peatonales (cuadro 3), que incluye los criterios seleccionados con sus respectivos rangos de valor.

Cuadro 3. Formato de evaluación: criterios seleccionados y rangos de valor

ACCESIBILIDAD	
1. Señal audible y/o vibratoria	
<i>Existe y está en funcionamiento</i>	1
<i>No está en funcionamiento</i>	0
<i>No existe</i>	0
2. Pavimento táctil	
<i>Existe</i>	1
<i>No existe</i>	0
3. Calidad de la banqueta en área de espera peatonal	
<i>Buena calidad del pavimento en ambas esquinas (superficie lisa)</i>	1
<i>Calidad del pavimento regular (grietas)</i>	0.5
<i>Mala calidad del pavimento (hoyos y cambios de nivel)</i>	0
<i>No hay banqueta en el área de espera peatonal</i>	0
4. Calidad del pavimento en área de cruce peatonal	
<i>Buena calidad del pavimento (superficie lisa)</i>	1
<i>Calidad del pavimento regular (grietas)</i>	0.5
<i>Mala calidad del pavimento (hoyos y cambios de nivel)</i>	0
5. Obstáculos fijos	
<i>Cruce sin obstáculos fijos (en ambas esquinas y sobre el cruce)</i>	1
<i>Cruce con un obstáculo fijo</i>	0.5
<i>Cruce con más de un obstáculo fijo</i>	0
6. Obstáculos móviles	
<i>Cruce sin obstáculos móviles (en ambas esquinas, sobre el cruce y en isleta)</i>	1
<i>Cruce con uno o más obstáculos móviles</i>	0
VISIBILIDAD	
7. Iluminación nocturna	
<i>Buena condición de iluminación (hay luminarias en ambos lados del cruce)</i>	1
<i>Condición de iluminación regular (sólo una luminaria o luz insuficiente)</i>	0.5
<i>Mala o nula condición de iluminación (no hay luminarias sobre el cruce)</i>	0
8. Obstáculos que obstruyen la vista	
<i>No hay obstáculos que impiden ver las señales y los vehículos</i>	1
<i>Hay obstáculos que impiden ver las señales y/o los vehículos</i>	0
DISEÑO	
9. Continuidad de pavimento	
<i>Escalón en una o más esquinas o en isleta/camellón (de más de 5 mm)</i>	0
<i>Rampas empinadas y/o angostas (ambas esquinas e isleta/camellón)</i>	0.5
<i>Rampas rectas, con abanico o alabeo en ambas esquinas e incluyendo isleta/camellón (alineadas)</i>	1
10. Distancia de cruce	
<i>Tres carriles o menos</i>	1
<i>Más de tres carriles, con isleta o camellón (no más de tres carriles de cada lado)</i>	1
<i>Más de tres carriles, sin isleta o camellón (más de tres carriles en un lado)</i>	0
11. Carril de contraflujo	
<i>No existe</i>	1
<i>Existe</i>	0
SEÑALAMIENTO HORIZONTAL	

12. Paso de cebra	
<i>Está bien marcado y se ve</i>	1
<i>No se ve bien y falta de mantenimiento</i>	0.5
<i>No está marcado</i>	0
13. Raya de alto	
<i>Está bien marcada y se ve</i>	1
<i>No se ve bien y falta de mantenimiento</i>	0.5
<i>No está marcada</i>	0
14. Flechas de dirección	
<i>Están bien marcadas y se ven</i>	1
<i>No se ven bien y faltan de mantenimiento</i>	0.5
<i>No están marcadas</i>	0
SEMAFORIZACIÓN	
15. Tiempo de espera antes de cruzar	
<i>Duración del verde vehicular de 60 segundos o menos</i>	1
<i>Duración del verde vehicular de 60 segundos o más</i>	0
16. Tiempo de cruce	
<i>No aplica (no funciona el semáforo vehicular)</i>	0
<i>$TFS \leq TC$</i>	0
<i>$TFS > TC$</i>	1
<i>donde:</i> <i>TFS: Tiempo de fase semafórica peatonal</i> <i>TC= D/VP = Tiempo de cruce peatonal</i> <i>D: Distancia de cruce</i> <i>VP: Velocidad promedio del peatón (0.7 m/s)</i>	
17. Vuelta a la derecha/izquierda	
<i>No aplica</i>	1
<i>Semáforo para vuelta a la derecha/izquierda protegida (fase coincide con la fase de semáforo peatonal)</i>	0.5
<i>Semáforo para vuelta a la derecha/izquierda protegida (fase no coincide con la fase del semáforo peatonal)</i>	1
<i>Vuelta a la derecha/izquierda sin semáforo</i>	0
18. Semáforo vehicular	
<i>Está en funcionamiento</i>	1
<i>No está en funcionamiento</i>	0
19. Semáforo peatonal	
<i>Existe y está en funcionamiento en la ubicación correcta (ambos lados)</i>	1
<i>No está en funcionamiento o está en la ubicación incorrecta (uno o más)</i>	0
<i>No existe o sólo está puesto en un lado del cruce</i>	0

Fuente: elaboración propia.

(iii) Prueba del instrumento en campo

Previo al levantamiento de los 503 cruces, se evaluaron veinte intersecciones, diez con el mayor número de atropellamientos y otras diez con un número bajo de atropellamientos (con base en datos de la SSP-2015). En cada intersección se evaluó el cruce peatonal con mayor número de puntos de conflicto. El tiempo promedio de levantamiento de datos en campo fue de 10 minutos durante el día y de 1 minuto durante la noche para evaluar el criterio 7 (iluminación nocturna). Para poder observar los diferentes elementos presentes en los cruces y evaluar los indicadores del índice, nos

posicionamos frente al cruce, en la esquina y contraesquina del mismo, fuera del área de espera (figura 9). También realizamos la observación frente al cruce y sobre el área de espera, y mientras cruzábamos para evaluar el estado del pavimento sobre el área de cruce peatonal.

Figura 9. Ángulo de observación para la evaluación de cruces peatonales



Fuente: Ruth Pérez

Este muestreo no aleatorio ni estadísticamente representativo de los cruces en Ciudad de México, no pretendió validar estadísticamente el índice. Se conformó únicamente para realizar una prueba piloto que permitiera mejorar tanto el instrumento de captura de datos (formato de evaluación), como enriquecer los diferentes rangos de valor de los criterios que componen el índice. Esta prueba de campo sirvió para probar y fortalecer la aplicabilidad del instrumento, ajustar los diferentes valores de los criterios, y evaluar la efectividad del propio ISCP.

iv) diseño de muestra, levantamiento del instrumento en campo y cálculo del ISCP

A partir de la base de datos de atropellamientos de la Secretaría de Seguridad Pública del Distrito Federal (SSP) reportados entre los años 2010 y 2016, se georreferenciaron los puntos en donde ocurrieron los eventos. Los accidentes fueron reportados por la SSP en la esquina más cercana (intersección entre dos vialidades) y no en el lugar exacto en donde ocurrieron, constituyendo esto un factor de error para cualquier prueba de correlación espacial. Del total de atropellamientos registrados en las bases de datos de la SSP, se georreferenciaron correctamente 18,296 eventos mediante la programación de un script para Google API.

Para la asignación de los eventos en los cruces y la identificación del universo de cruces a evaluar, se intersectaron espacialmente los semáforos con las vialidades primarias y con los atropellados a no más de 20 metros de distancia del eje de las vialidades primarias, de tal modo que quedaran solo los semáforos que sirven a las vialidades primarias, así como los accidentes asociados a estas vías. Posteriormente, se asignaron espacialmente los eventos de atropellamientos al semáforo más cercano y se eliminaron los semáforos asociados a los cruces rehabilitados durante los años 2015 y 2016, a través del programa “Cruces seguros”.

Por último, se generó una muestra estadística estratificada con un total de 540 cruces. Los estratos son de mínima varianza, con el objetivo de poder seleccionar la muestra del mismo tamaño en todos los estratos. El estrato 1 lo forman los 6,049 semáforos que no reportan atropellamientos. El segundo lo forman los que reportan entre 1 y 5 atropellamientos que son 1,332 semáforos. El tercer estrato los que tienen 6 o más atropellamientos, que son 317 semáforos. La muestra fue distribuida de la siguiente forma: 180 semáforos en el primer estrato; 180 en el segundo; y 190 en el tercero (ver figura 10).

Figura 10. Muestra estratificada de semáforos sobre vialidades primarias con base en número de atropellamientos cercanos N=540



Fuente: elaboración propia.

Dado que en el trabajo de campo se vislumbra la dificultad de decidir que cruce evaluar una vez llegado a determinado semáforo (una intersección oscila entre 4 o más cruces peatonales) se llevó a cabo un trabajo posterior para identificar exactamente el punto (x,y) a evaluar con el objetivo de reducir tiempos de levantamiento.

Para la evaluación de los cruces peatonales, el equipo del Laboratorio de Geointeligencia de CentroGeo diseñó y programó una herramienta digital —montadas en 4 tabletas digitales— para facilitar el levantamiento de los datos en campo el cual facilita la recolección de los datos en campo. Los diferentes rubros cuentan con una sección de preguntas y sus opciones de respuesta. Cada respuesta tiene asignada su respectivo puntaje para poder calcular posteriormente el valor del índice. El cuestionario se asoció a cada uno de los 540 cruces peatonales, asignándose 270 cruces a cada equipo de trabajo diurno y 270 al equipo de trabajo nocturno. La herramienta de auditoría de los cruces peatonales es un instrumento didáctico, práctico, fácil y rápido de implementar en cualquier cruce peatonal situado sobre una vialidad primaria.

Figura 11. Cuestionario instalado en tabletas digitales

Continuidad del pavimento

- ☐ Escalón en una o más esquinas o en isleta/camellón (de más de 5 mm)
- ☐ Rampas empinadas y/o angostas (ambas esquinas e isleta/camellón)
- ☐ Rampas rectas, con abanico o alabeo en ambas esquinas e incluyendo isleta/camellón (alineadas)

Distancia de cruce

- ☐ Tres carriles o menos
- ☐ Más de tres carriles, con isleta o camellón (no más de tres carriles de cada lado)
- ☐ Más de tres carriles, sin isleta o camellón (más de tres carriles en un lado)

Carril de contraflujo

- ☐ No existe
- ☐ Existe

Señalamiento Horizontal

Semaforización

Fuente: elaboración propia.

Para la colecta de datos en campo, se contrataron a cuatro personas con experiencia en bici-mensajería (que supieran orientarse en la ciudad y pudieran desplazarse fácilmente en bicicleta de un punto al otro) y/o en levantamiento de datos. Se conformaron dos equipos de dos personas a quienes se les asignaron una cantidad predefinida de cruces. Cada equipo dispuso de una tableta

digital para el registro de los datos, de un odómetro mecánico para medir la distancia de cruce, de un cronómetro para medir el tiempo de cruce y de un chaleco de seguridad.

Figura 12. Herramientas utilizadas para el levantamiento de datos en campo



Fuente: elaboración propia.

Ambos equipos se encargaron de evaluar durante el día, 18 de los 19 criterios que componen el Índice de Seguridad de Cruces Peatonales (ISCP). Con la finalidad de capturar el criterio relativo a la iluminación nocturna, se contrataron dos personas complementarias (equipo de noche). Por cuestiones de seguridad y, a diferencia del equipo de día, el equipo de noche hizo el levantamiento de datos en automóvil.

Figura 13. Equipo de levantamiento de datos en campo



Fuente: elaboración propia.

Previamente a la etapa de levantamiento de datos, se impartió un curso de inducción a los tres equipos durante el cual se les explicó en qué consistía la metodología y la forma precisa de evaluar cada criterio y de capturar los datos en la tableta digital. Posteriormente, se llevó a cabo un nuevo ejercicio de campo en tres cruces de la ciudad y se resolvieron dudas.

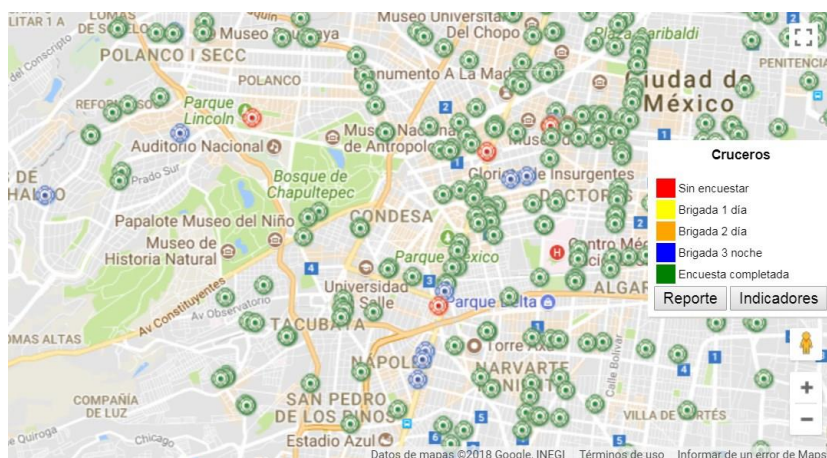
Figura 14. Curso de inducción para el levantamiento de datos en campo



Fuente: elaboración propia.

El levantamiento de datos se llevó a cabo del 24 de julio al 17 de septiembre del 2017. A lo largo de este proceso, los coordinadores estuvieron supervisando el trabajo de campo mediante una plataforma digital, la cual permitió revisar en tiempo real el estatus del levantamiento de los datos. El tiempo promedio de levantamiento de datos en los cruces fue de 10 minutos.

Figura 15. Captura de pantalla de la plataforma digital de seguimiento de levantamiento de información en campo



Fuente: elaboración propia.

Al finalizar la etapa de levantamiento de datos, se llevó a cabo una reunión de retroalimentación durante la cual los equipos de campo compartieron sus experiencias con respecto al proceso de levantamiento de datos y, en particular, a las dificultades enfrentadas durante el mismo.

Figura 16. Reunión de retroalimentación del trabajo de campo, 29 de septiembre del 2017



Fuente: elaboración propia.

Al tiempo que cada equipo de levantamiento de datos en campo iba subiendo la información a la plataforma en tiempo real, el ISCP para cada uno de los indicadores fue calculado automáticamente, de modo que para el final del levantamiento ya se tenía la base completa con los valores finales de los 19 criterios, de los 5 macro criterios, y del valor final ISCP. Desde la propia plataforma digital fue posible descargar los datos en crudo, tanto los valores crudos de cada uno de los criterios, como los valores calculados (ponderados).

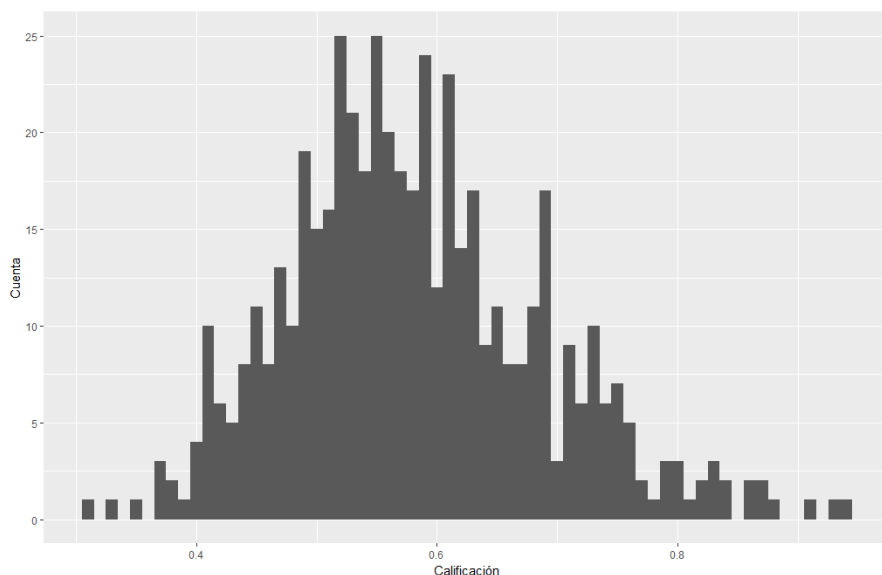
v) confrontación del ISCP con datos de atropellamientos de SSP-2010-2016

A pesar de que la literatura especializada recomienda no generar índices de cruces peatonales con base en hechos de tránsito —debido a su aleatoriedad, dificultad en la recopilación de los datos, y a la poca claridad con la que son levantados—, se procedió a confrontar tanto el valor del ISCP final de los cruces como sus propias variables desagregadas (los 19 criterios) con la base de datos de hechos de tránsito facilitada por la SSP para el periodo 2010-2016. Se buscó con ello explorar la posibilidad de que esta herramienta no solo permitiera el mejoramiento de las condiciones de cruce y la jerarquización de prioridades para la acción pública, sino que fuera una herramienta útil para predecir hechos de tránsito.

De los 540 cruces, pudieron ser levantados adecuadamente 503, de los cuales se descartaron un porcentaje adicional (muestra final N=490) por presentar errores en algunas variables específicas

como distancia y tiempo de cruce. El siguiente gráfico muestra la distribución del índice de seguridad peatonal.

Figura 17. Histograma del índice de seguridad

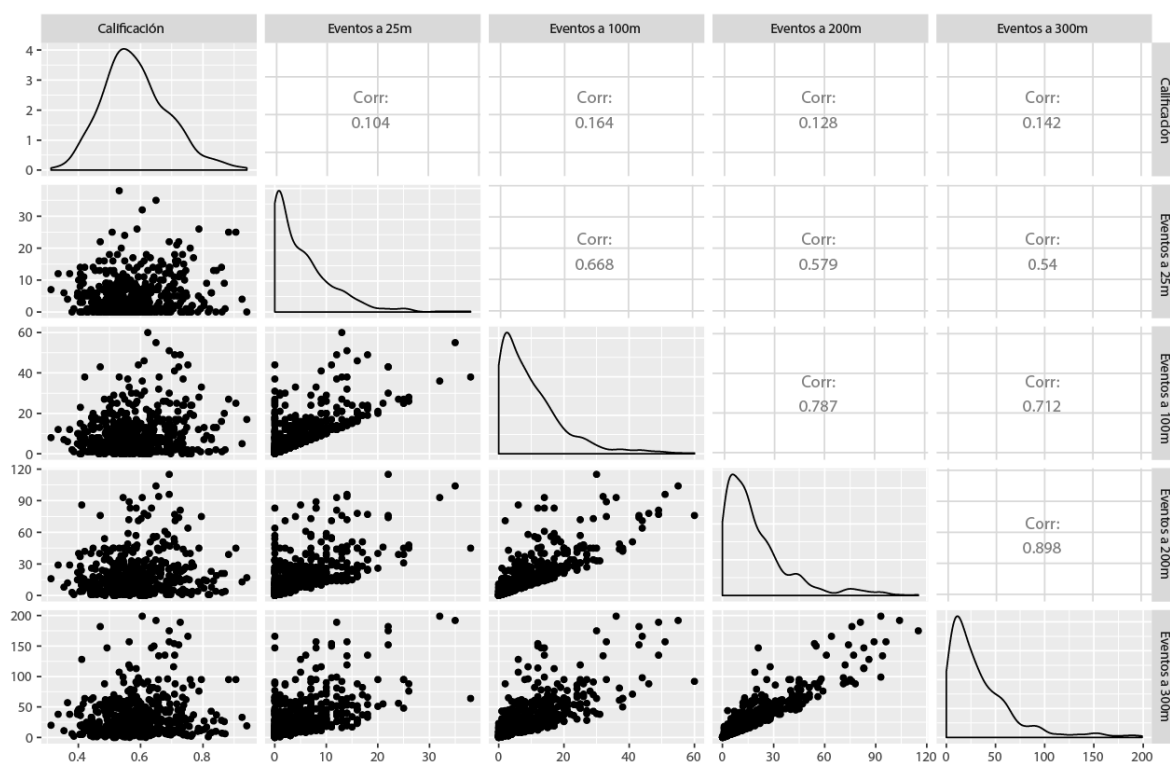


Fuente: elaboración propia.

Se construyeron dos variables dependientes para probar la relación de los resultados en campo mediante correlaciones bivariadas: la cantidad de hechos de tránsito a diferentes distancias del centroide de cada uno de los cruceros levantados (distancias de 25, 100, 200 y 300 metros) el igual número de variables pero con una tasa calculada con cantidad de hechos de tránsito entre el número de personas que habitan en esa zona más el número de personas que trabajan en esa zona, medidos a igual número de distancia. El objetivo de probar esta tasa era aproximar una unidad probabilística, ya que suponíamos los hechos de tránsito deberían de medirse con relación a la posibilidad de ser atropellado dada la cantidad de flujo existente, no solo como datos puntuales. Sin embargo, los propios hechos de tránsito *per se* parecen funcionar adecuadamente como variable dependiente. La figura 18 muestra la distribución de la calificación de los cruceros versus los incidentes de tránsito (a diferentes distancias).

Existe una débil correlación positiva entre la calificación de los cruceros con la medida de incidentes, lo que implica a que una mejor calificación se asocia con más incidentes, siendo esto un resultado opuesto a lo esperado. Los diagramas de dispersión (figura 18) muestran lo ruidoso de las débiles correlaciones. Dado este resultado contra intuitivo, se optó por probar si los componentes del índice por separado se asocian con la cuenta de accidentes de tránsito. En el siguiente apartado se detallan las diferentes estrategias analíticas tanto cualitativas como cuantitativas.

Figura 18. Gráfico de pares entre el índice de seguridad y cuentas de incidentes a diferentes radios de distancia



Fuente: Construcción propia con base en el trabajo de campo y georreferencia de hechos de tránsito por parte de Jair Arriaga Carbajal.

4. Resultados

Aproximación cuantitativa

Se utilizaron dos métodos diferentes para aproximar un modelo predictivo. Por un lado, se utilizaron *modelos inflados por cero*, y por otro, *árboles de decisión*. Adicionalmente, se generó un trabajo de correlación entre las variables del índice y una medida de accesibilidad física de la red vial (*Space Syntax* o mapas axiales).

Como en muchos casos de cuentas, encontramos una cantidad importante de cruceros sin incidentes (105 de los 490 con valores válidos), por lo que para analizar los datos se eligió el uso de *modelos inflados por cero*. La estrategia de análisis es adecuada cuando hay una sobrerrepresentación de ceros y consiste de la mezcla de dos modelos que combinan el punto de masa en el cero con una distribución de cuenta propiamente especificada. Los dos modelos combinados son uno de distribución *Poisson* para las cuentas y otro con una distribución *binomial* (logit en nuestro caso) para

la inflación de ceros. El segundo modelo ayuda a diferenciar qué variables pueden explicar los ceros en los datos originales (Cameron *et al.*, 2005; Zeileis *et al.*, 2008).

Por otra parte, los árboles de decisión son métodos útiles como modelos predictivos, ya que funcionan mediante una clasificación de casos en diversos grupos, permitiendo pronosticar valores de un criterio dependiente con base en valores de criterios independientes (IBM, 2017).

Modelo inflado por ceros

De las 20 variables del índice, se eliminaron algunas por ser constantes (Distancia de cruce suficiente; tiempo de espera antes de cruzar), y otras se eliminaron porque no se rechazó la hipótesis nula de que los coeficientes tienen un efecto distinto de cero (Señal audible o vibratoria del semáforo, Calidad de la banqueta en el área peatonal, tiempo suficiente de cruce, y vuelta a la derecha o izquierda). La mayoría de las variables son ordinales con dos clases codificadas de modo que los valores altos son los que implican una buena calificación.

Para una segunda especificación del modelo, se incorporó una variable que capta la oportunidad de ocurrencia de un incidente. Consiste en un índice de mezcla de usos de suelo (Cervero y Cockelman, 1997). La idea subyacente es que a mayor mezcla de uso de suelo o a mayor presencia de suelo comercial (Carter *et al.*, 2016) habrá mayor diversidad de actividades y por ende más personas y más oportunidades de conflicto vehículo-peatón.

De las 20 variables del índice, se eliminaron algunas por ser constantes (distancia de cruce suficiente; tiempo de espera antes de cruzar), y otras se eliminaron porque no se rechazó la hipótesis nula de que los coeficientes tienen un efecto distinto de cero (señal audible o vibratoria del semáforo, calidad de la banqueta en el área peatonal, tiempo suficiente de cruce, y vuelta a la derecha o izquierda). La mayoría de las variables son ordinales con dos clases codificadas de modo que los valores altos son los que implican una buena calificación.

Para una segunda especificación del modelo se incorporó una variable que capta la oportunidad de ocurrencia de un incidente, consiste en un índice de mezcla de usos de suelo, la idea subyacente es que a mayor mezcla de uso de suelo habrá mayor diversidad de actividades y por ende más personas.

El primer modelo (especificación 1, cuadro 4) sólo incluye los indicadores que componen el índice de seguridad. En este caso, la mayoría de las variables resultaron tener una asociación significativa. Aunque la mitad de ellas tienen un signo opuesto a lo esperado en términos teóricos, el resto se comportan como la teoría lo predice.

Cuadro 4. Regresiones infladas por cero (variable dependiente: cuenta de incidentes de tránsito)

	Especificación 1 (sin mezcla de usos de suelo)				Especificación 2 (con mezcla de usos de suelo)			
	Modelo de cuentas (Poisson)		Modelo inflado por cero (logit)		Modelo de cuentas (Poisson)		Modelo inflado por cero (logit)	
	Coef.	E. E.	Coef.	E. E.	Coef.	E. E.	Coef.	E. E.
Intercepto	1.613	(0.097) ***	-1.788	(0.579) **	1.075	(0.109) ***	-0.612	(0.661)
Pavimento táctil (Dummy)								
Calidad del pavimento en área de cruce peatonal (ref= 0 'mala')								
Regular	-0.164	(0.046) ***	-0.520	(0.285) .	-0.166	(0.046) ***	-0.540	(0.292) .
Buena	-0.195	(0.061) **	0.288	(0.316)	-0.260	(0.062) ***	0.310	(0.328)
Obstáculos fijos (ref = 0 'Más de un obstáculo')								
Uno obstáculo	0.089	(0.063)	0.294	(0.386)	-0.036	(0.065)	0.429	(0.400)
Ningún obstáculo	0.204	(0.073) **	0.716	(0.416) .	0.156	(0.074) *	0.768	(0.427) .
Obstáculos móviles (Dummy)	-0.334	(0.044) ***	0.120	(0.259)	-0.283	(0.044) ***	0.058	(0.267)
Iluminación nocturna (ref = 0 'Mala')								
Regular	-0.125	(0.065) .	-0.034	(0.333)	-0.090	(0.065)	-0.047	(0.343)
Buena	0.059	(0.067)	-0.490	(0.372)	0.051	(0.068)	-0.553	(0.386)
Obstáculos visuales (Dummy)	0.156	(0.051) **	-0.048	(0.286)	0.182	(0.052) ***	-0.130	(0.292)
Continuidad de pavimento (ref = 0 'Hay escalón')								
Muy empinada	0.144	(0.059) *	-0.642	(0.416)	0.131	(0.059) *	-0.599	(0.429)
Adecuada	0.348	(0.067) ***	-0.038	(0.414)	0.346	(0.066) ***	0.037	(0.427)
Carril de contraflujo o doble sentido	-0.125	(0.047) **	0.460	(0.300)	-0.156	(0.047) ***	0.503	(0.307)
Paso de cebra (ref= 0 'No está marcado parcial/totalmente')								
No se ve bien	-0.109	(0.055) .	-0.207	(0.309)	-0.105	(0.056) .	-0.259	(0.320)
Está bien marcado y es visible	-0.004	(0.077)	-0.609	(0.465)	0.044	(0.077)	-0.784	(0.487)
Raya de alto (ref = 0 'No está marcada/no aplica')								
No se ve bien	0.259	(0.056) ***	0.249	(0.314)	0.229	(0.057) ***	0.353	(0.327)
Está bien marcada y es visible	0.068	(0.082)	0.250	(0.477)	0.038	(0.083)	0.327	(0.498)
Flechas de dirección (Dummy)	0.233	(0.068) ***	0.374	(0.399)	0.214	(0.070) **	0.498	(0.408)
Semáforo peatonal (Dummy)	0.140	(0.047) **	-0.211	(0.297)	0.077	(0.047)	-0.089	(0.309)
Tiempo de luz roja	0.001	(0.001) *	0.000	(0.004)	0.001	(0.001) .	0.001	(0.004)
Distancia del cruce	0.008	(0.001) ***	0.013	(0.007) .	0.006	(0.001) ***	0.016	(0.007) *
Mezcla de usos de suelo					1.846	(0.162) ***	-4.560	(1.216) ***
Log-likelihood	-1608				-1535			
Pseudo R ² de McFadden	0.098				0.139			
Pseudo R ² de Cox and Snell	0.511				0.637			
Pseudo R ² de Nagelkerke	0.512				0.638			

Nota: Código de significancia 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1

Fuente: construcción propia.

Un elemento a resaltar es que al menos una variable de cada macrocriterio se comporta adecuadamente. Para *accesibilidad* hay dos variables: a *mejor la calidad del pavimento*, el modelo predice menos incidentes; la *ausencia de obstáculos móviles* se asocia con menos incidentes; en el criterio de *visibilidad*, la *iluminación regular* se relaciona con menos incidentes que la *iluminación mala*; en el criterio de *diseño*, la *existencia de camellón* o *si hay señalización* se asocia con menos incidentes que los cruceros en *vialidades con contraflujo* o de *doble sentido*; en cuanto al *señalamiento horizontal del paso de cebra*, si su calidad es regular hay menos incidentes que donde no existe (si bien en este caso flexibilizamos el umbral de significancia de 0.05 a 0.1); y por último, las únicas variables continuas de las mediciones en campo son las que se comportan como se

espera: a *mayor distancia* y a *mayor tiempo de cruce* hay más incidentes. Estas dos variables por si solas implican 9% de la R2 de Nagelkerke y Cox.

Al incorporar la variable de mezcla de usos de suelo (especificación 2), el ajuste del modelo mejora sustancialmente, pero la categoría de iluminación nocturna deja de ser significativa, lo que implica, desde esta perspectiva, que más incidentes se asocian con una mayor mezcla de usos de suelo y por ende, con mayor actividad, lo que corroboraría lo que el modelo PED ISI (Carter *et al.*, 2016) ya pronosticaba con la inclusión de la variable de uso de suelo comercial como *proxy* de cantidad de flujos.

Los cuadros siguientes muestran respectivamente, los resultados obtenidos de manera resumida con los modelos inflados por cero, y los estadísticos descriptivos de las variables.

Cuadro 5. Resumen de los resultados de los modelos

Macrocritorio	Indicadores	¿Signo esperado?
Accesibilidad	Señal audible y/o vibratoria (Dummy)	No significativa
	Pavimento táctil (Dummy)	No
	Calidad del pavimento en área de cruce peatonal (ref= 0 'mala')	Si
	Calidad dela banqueta en área de cruce peatonal (dummy)	No significativa
	Obstáculos fijos (ref = 0 'Más de un obstáculo')	No
	Obstáculos móviles (Dummy)	Si
Visibilidad	Iluminación nocturna (ref = 0 'Mala')	Si
	Obstáculos visuales (Dummy)	No
Diseño	Continuidad de pavimento (ref = 0 'Hay escalón')	No
	Distancia de cruce alcanzable	Constante
	Carril de contraflujo o doble sentido	Si
Señalamiento horizontal	Paso de cebra (ref= 0 'No está marcado parcial/totalmente)	Si
	Raya de alto (ref = 0 'No está marcada/no aplica')	No
	Flechas de dirección (Dummy)	No
Semaforización	Tiempo de espera antes de cruzar	Constante
	Tiempo suficiente de cruce (Dummy)	No significativa
	Semáforo peatonal (Dummy)	No
	Tiempo de luz roja (Metros)	Si
	Distancia del cruce (segundos)	Si

Fuente: construcción propia.

Cuadro 6. Estadísticos descriptivos de las variables

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Eventos (25 metros)	0	38	5.23	5.907
Eventos (100 metros)	0	60	9.91	9.946
Eventos (200 metros)	0	115	19.55	19.475
Eventos (300 metros)	0	199	33.91	34.097
Señal audible y/o vibratoria	0	1	.05	.224
Pavimento táctil	0	1	.07	.247
Calidad de la banqueta en área de espera peatonal	1	3	1.42	.644
Calidad del pavimento en área de cruce peatonal	1	3	1.80	.780
Obstáculos fijos	1	3	1.29	.616
Obstáculos móviles	0	1	.66	.474
Iluminación nocturna	1	3	2.22	.675
Obstáculos que obstruyen la vista	0	1	.76	.429
Continuidad de pavimento	1	3	1.41	.722
Distancia de cruce			.10	0.000
Carril de contraflujo o doble sentido	0	1	.69	.463
Paso de cebra	1	3	1.83	.750
Raya de alto	1	3	1.88	.724
Flechas de dirección	0	1	.16	.364
Tiempo de espera antes de cruzar	0	1	.39	.487
Tiempo suficiente de cruce	1	1	1.00	0.000
Vuelta a la derecha/izquierda	0	1	.48	.500
Semáforo peatonal	0	1	.24	.426
Tiempo del rojo	15	555	53.680	27.706
Distancia del cruce	6.65	227.00	27.707	15.288
Mezcla de uso de suelo promedio (a 100 metros)	0.058	0.649	0.307	0.119
Mezcla de uso de suelo promedio (a 200 metros)	0.063	0.637	0.307	0.114

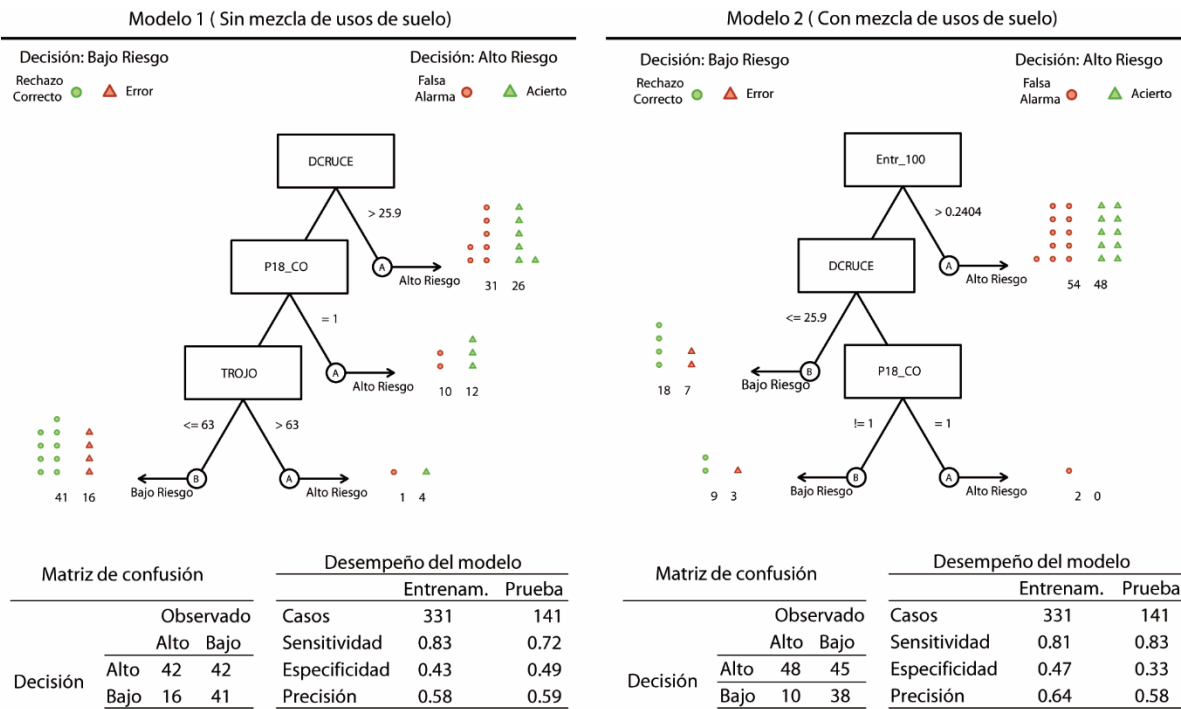
Fuente: construcción propia.

Árboles de decisión

Relativo al modelaje con base en árboles de decisión del tipo *Fast Frugal decisión Trees* (Phillips *et al.*, 2017) implementados en R, primero los cruceros fueron clasificados en dos categorías a predecir: cruceros de alto y de bajo riesgo. En una segunda etapa, se desarrollaron dos diferentes modelos: uno con la mezcla de uso del suelo incluida como variable independiente y otro sin ella, del mismo modo que con el modelaje inflado por ceros.

Al limpiar la base de datos para este modelaje, la muestra se redujo a 472 observaciones debido a la presencia de datos perdidos en la variable objetivo. Se escogió una división para el conjunto de entrenamiento de 70% y el 30% restante de observaciones para prueba (Ver Figura 19).

Figura 19. Modelaje mediante árboles de decisión *fast frugal trees*



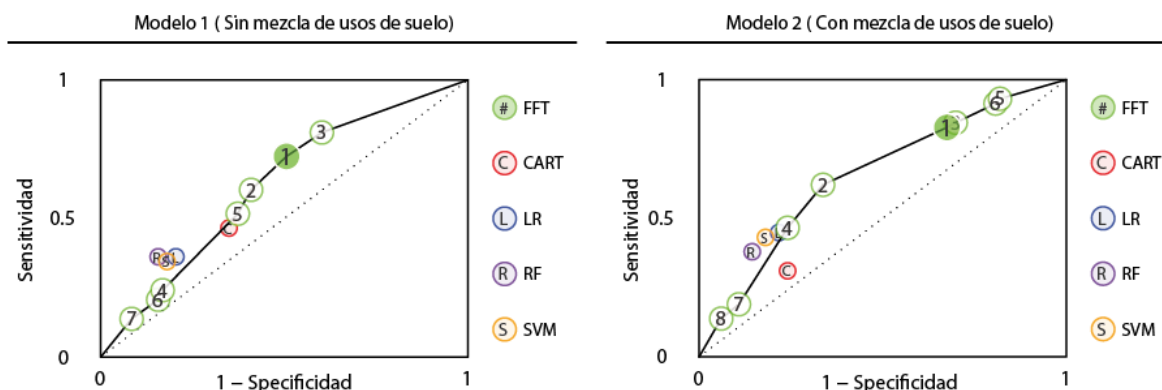
Fuente: construcción propia.

El modelo sin mezcla de usos de suelo (modelo 1) incorpora 3 de las 18 variables evaluadas en campo; predice correctamente 72% de los cruceros de alto riesgo y 51% de los de bajo riesgo con una precisión total de 59%. Al incorporar la variable de mezcla de usos de suelo con tres de 20 variables el resultado mejora: 83% de los cruceros de alto riesgo correctos y 54% de los de bajo riesgo. Sin embargo, la precisión global empeora ligeramente en el conjunto de prueba del modelo con sólo 58%. Aún con la relativamente baja precisión de las predicciones (8%~9% mejor que el azar), es interesante observar que los resultados convergen. En ambos casos, entre las variables del índice que los modelos identifican como relevantes se encuentra la distancia de cruce (con 25.9 metros como umbral) para predecir los cruceros más peligrosos, elemento fundamental de la seguridad peatonal. La mezcla de usos del suelo es la variable explicativa más importante cuando es incluida en el modelaje.

Otra forma de evaluar el desempeño de los modelos es mediante el análisis del área bajo la curva del gráfico de sensibilidad vs. 1- especificidad, mientras mayor sea el área bajo la curva —alta sensibilidad y baja especificidad— los resultados son mejores. El siguiente gráfico compara el desempeño del método empleado (FFT) contra algunos de los algoritmos más comunes de

clasificación supervisada². La conclusión es que el método empleado supera al resto de los algoritmos, aunque el área bajo la curva es de 59% para el modelo 1 y 60% para el modelo 2.

Figura 20. Evaluación de los resultados de los árboles de decisión



FUENTE: Construcción propia.

Análisis de variables del índice con la estructura urbana

Space Syntax es un enfoque científico que investiga las relaciones entre una estructura espacial y un amplio rango de fenómenos sociales, económicos y ambientales (Space Syntax, 2018). Fue ideado por Bill Hillier hacia los años setenta y cuenta con módulos computacionales que permiten generar mapas axiales que representan un proxy de la estructura espacial.

En Space Syntax, por medio del programa Depthmap® se estimaron las variables de conectividad, conectividad angular, y largo de calle para toda Ciudad de México dentro del entorno Space Syntax®. Estas variables se definen de la siguiente manera:

- *Conectividad*: es el número de arcos de la red a la que se tiene acceso desde otro arco.
- *Conectividad angular*: es la distancia medida en ángulos.
- *Largo*: es simplemente cuantos metros mide el segmento.

Se asignó entonces a cada cruce peatonal muestreado los datos promedio de los indicadores Space Syntax. A las calles, además se les asoció el número de hechos de tránsito por cercanía a diferentes distancias.

² FFT= Fast Frugal Trees; CART = Árboles de clasificación clásicos; LR = Regresión logística; RF= Bosques aleatorios; SVM = Máquinas de soporte vectorial.

Se decidió asignar a cada punto (cruce peatonal muestreado) las características de la vialidad en lugar de asignar los valores de puntos a la vialidad. De esta forma, cada punto tiene una densidad de los puntos que ocurrieron en el nodo a diferentes distancias.

Relación de morfología

La hipótesis de la que se parte para analizar el arreglo espacial de Ciudad de México y confrontarlo con los hechos de tránsito y los valores del ISCP es que las calles con mayor conectividad, mayor profundidad angular y mayor extensión, son más peligrosas. Para ello se clasificaron los segmentos en peligrosos y no peligrosos. Dependiendo del radio:

Cuadro 7. Clasificación de segmentos

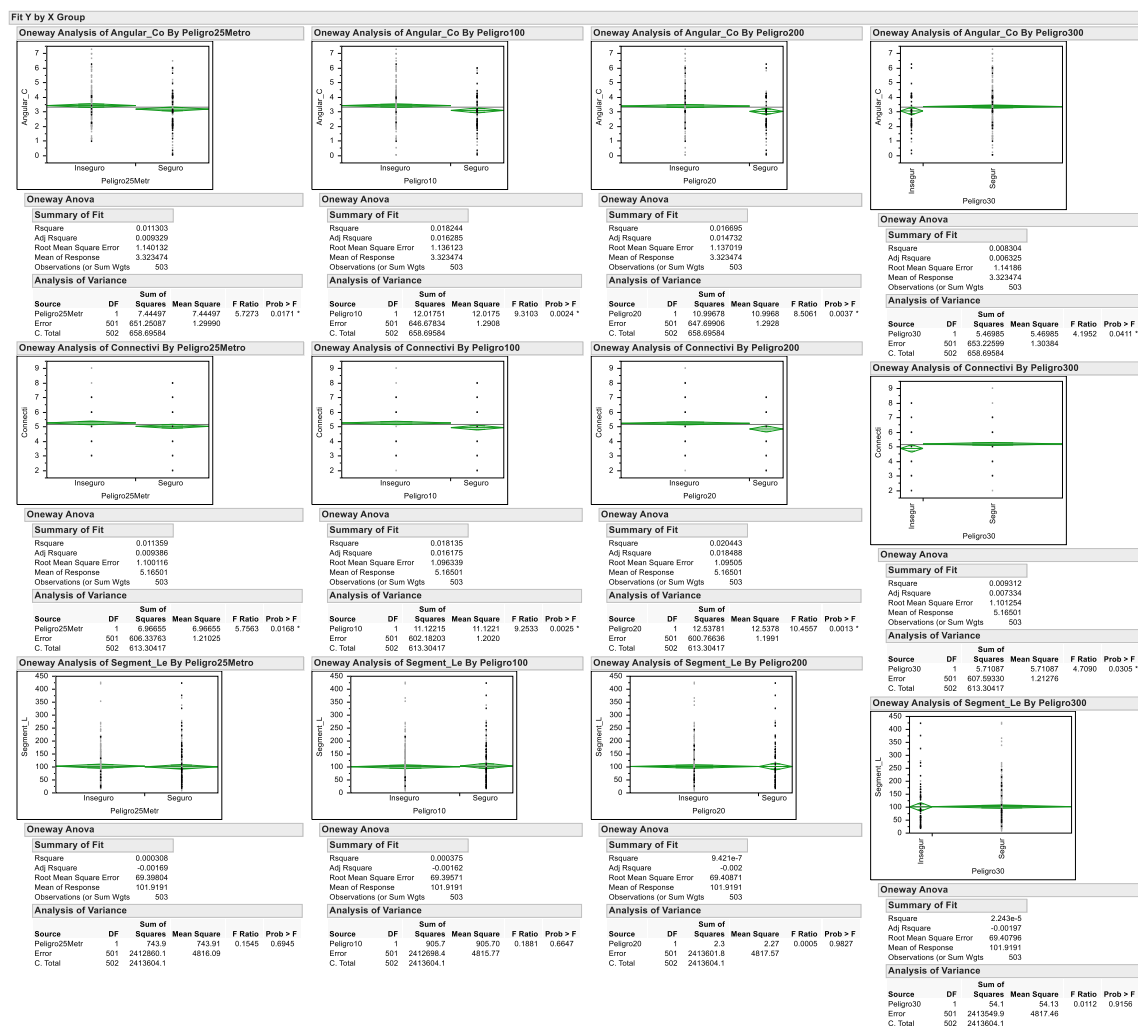
Radio (m)	No Peligrosos	Peligrosos
25	<3 eventos	El resto
100	<4 eventos	El resto
200	<5 eventos	El resto
300	<6 eventos	El resto

Se obtiene la comparación de medias mediante ANOVA para concluir si podemos presumir inicialmente que las calles con mayor conectividad, mayor profundidad o mayor extensión son más peligrosas considerando los distintos radios, o bien si las calles peligrosas tienen un promedio en las distintas variables significativamente diferente. Para ello usamos los estadísticos F y p.

El cuadro de abajo es un resumen de las corridas, donde se puede leer la F y p de F (F; p de F). De estas obtenemos que tan bien marcados están los grupos de inseguras y seguras, es decir, si podemos presumir si las inseguras son diferentes o iguales según las distintas respuestas. Apreciamos que aunque no son muy grandes las F, si nos permiten indicar que los dos tipos de calles son diferentes en algunos factores. También permiten señalar que las calles inseguras en todos los radios tienen menor conectividad angular y simple, pero eso no ocurre con el largo de la calle. También se sugiere llevar a cabo otras pruebas con otros supuestos de normalidad y Curvas ROC.

Cuadro 8. Valores resumen características de mapa axial

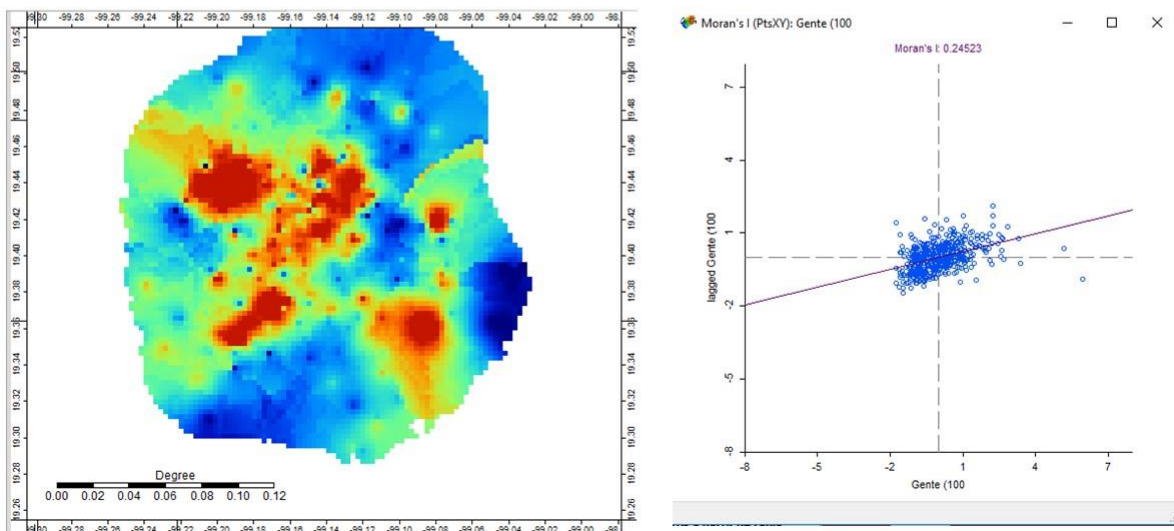
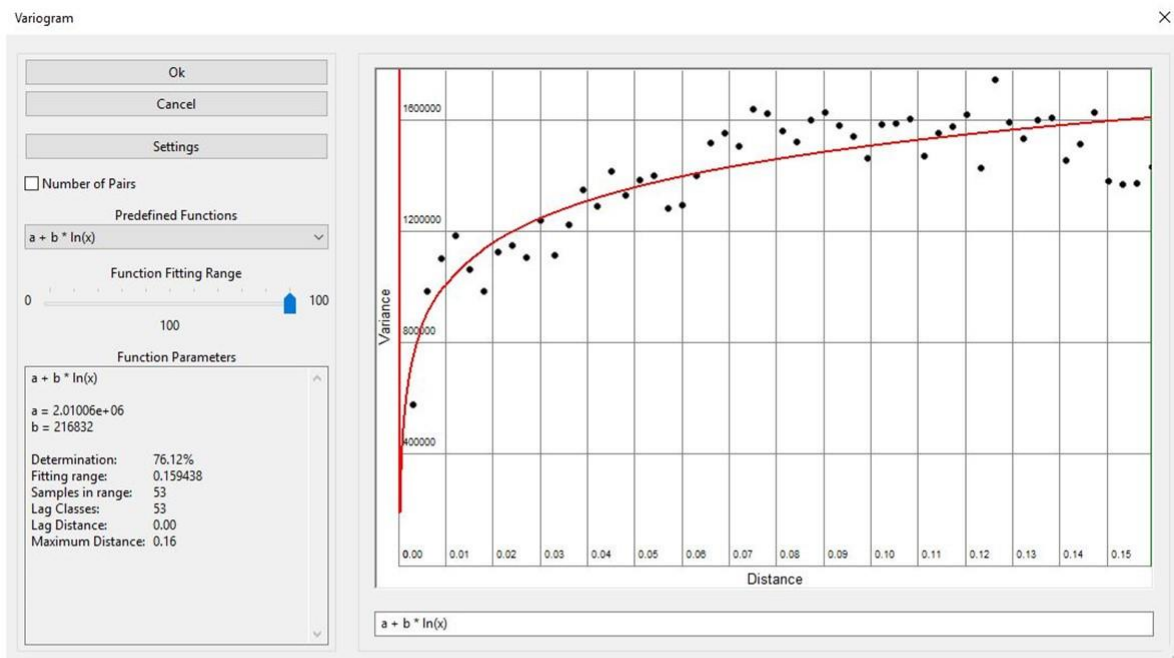
	25	100	200	300
Conectividad angular	5.7; 0.0171	9.2; 0.0024	8.5; 0.0037	4.19; 0.0411
Conectividad	5.7; 0.0168	9.2; 0.0029	10.45; 0.0013	4.7; 0.0309
Largo	0.1545; 0.6945	0.1881; 0.6847	0.0005; 0.9827	0.0112; 0.9156

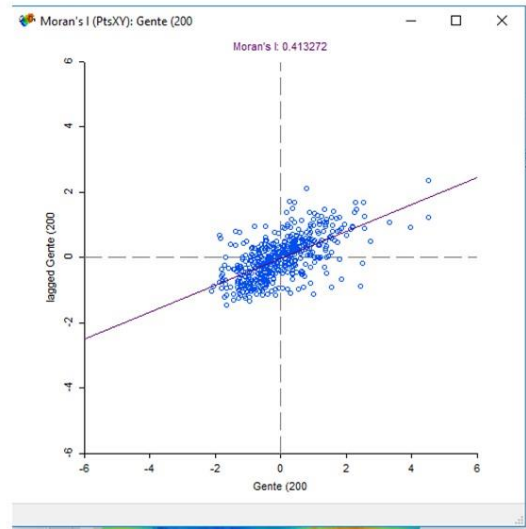
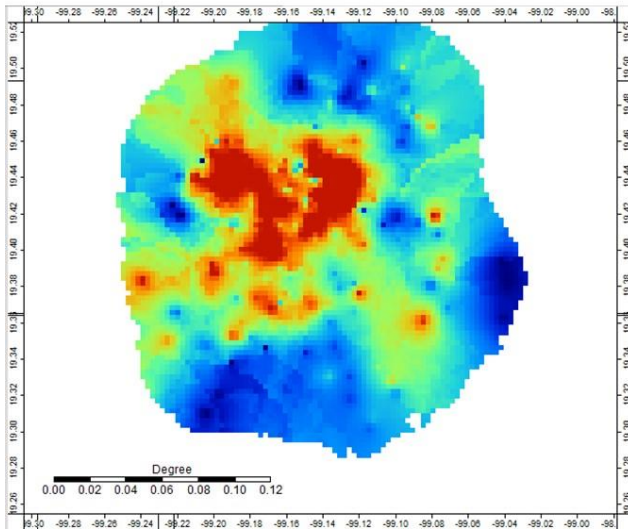
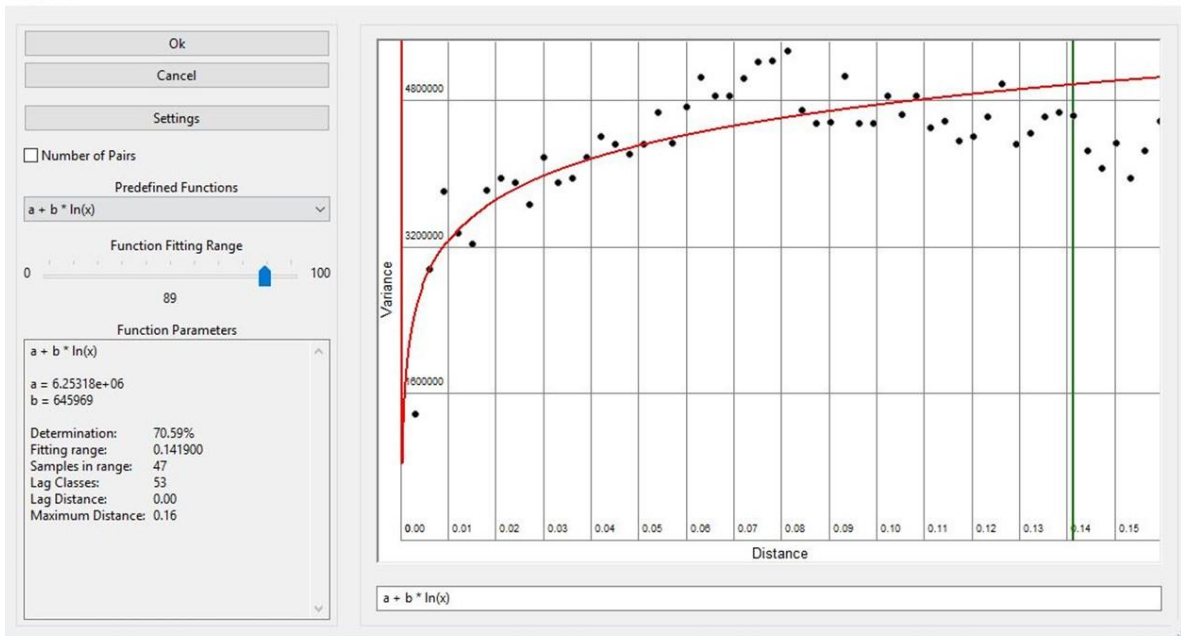


como concentración de la peligrosidad en ciertas áreas de la ciudad. Es decir “el peligro se concentra”.

El semivariograma obtenido mediante una transformación logarítmica, nos indica que con la meseta entre los 70 y 130 metros, luego de esta distancia habrá menos influencia entre los puntos en cuanto a su peligrosidad, lo cual es congruente con la idea intuitiva de calles de aproximadamente 100 metros.

Eventos a 200





Aproximación cualitativa

A diferencia de los ejercicios de modelaje anteriores, el siguiente sub apartado da cuenta de la importancia de la puesta en práctica de un ISCP como herramienta que permita conocer las condiciones infraestructurales actuales de los cruces y, eventualmente, servir de insumo para que las autoridades encargadas ejerzan presupuesto para la remediación.

A continuación se presentan los siguientes resultados descriptivos de la evaluación de 503 cruces peatonales en Ciudad de México, los cuales serán discutidos con mayor amplitud en el siguiente acápite y que se presentan, de manera resumida, en una infografía Anexa.

Para evaluar el nivel de calidad en los cruces peatonales, se determinó establecer la siguiente escala:

0 – 0.39	Muy baja calidad
0.40 – 0.59	Baja calidad
0.60 – 0.79	Calidad regular
0.80 – 0.89	Buena calidad
0.90 – 1	Muy buena calidad

Con base en la escala anterior, se obtuvieron los siguientes resultados generales:

Muy baja calidad	51.9%
Baja calidad	39.4%
Calidad regular	8.3%
Buena calidad	0.4%
Muy buena calidad	0.0%

La tabla anterior consigna el hecho de que **91.3%** de los cruces son de baja o de muy baja calidad.

Cuadro 9. Resultados de la evaluación por microcriterio

MICROINDICADORES	RESULTADOS
Señal audible y/o vibratoria	<i>5% de los cruces cuentan con una señal audible y/o vibratoria para personas con discapacidad visual</i> 95% no cuentan con una señal audible y/o vibratoria
Pavimento táctil	<i>7% de los cruces cuentan con pavimento táctil</i> 93% de los cruces no cuentan con pavimento táctil
Calidad de la banqueta en área de espera peatonal	67% de las banquetas (área de espera) tiene mala calidad del pavimento en alguna de las esquinas (hoyos y cambios de nivel) o no cuentan con área de espera <i>25% de las banquetas (área de espera) tiene una calidad del pavimento regular</i> <i>8% de las banquetas (área de espera) tiene una buena calidad del pavimento en ambas esquinas</i>

Calidad del pavimento en área de cruce peatonal	En 42% de los cruces, la calidad del pavimento en el área de cruce peatonal es MALA En 36% de los cruces, la calidad del pavimento en el área de cruce peatonal es REGULAR En 22% de los cruces, la calidad del pavimento en el área de cruce peatonal es Buena
Obstáculos fijos	81% de los cruces tienen obstáculos fijos 9% de los cruces no tienen obstáculos
Obstáculos móviles	34% de los cruces tienen obstáculos móviles 66% de los cruces no tiene obstáculos móviles
Iluminación nocturna	15% de los cruces tienen una mala o nula iluminación 49% de los cruces tienen una condición de iluminación regular 36% de los cruces tienen una buena condición de iluminación
Obstáculos que obstruyen la vista	24% de los cruces tienen obstáculos fijos o móviles que obstruyen la vista 76% de los cruces no tienen obstáculos fijos o móviles que obstruyen la vista
Continuidad de pavimento	73% de los cruces no tienen rampas 13% de los cruces tienen rampas empinadas o angostas Únicamente 14% de los cruces cuentan con rampas rectas, con abanico o alabeo
Distancia de cruce	En 74% de los cruces, la distancia de cruce es demasiado larga (más de tres carriles) En 26% de los cruces la distancia para cruzar es (tres carriles o menos).
Carril de contraflujo o doble sentido	Cruces sobre vialidades de doble sentido o con carril de contraflujo que no cuentan con separación: 26% Cruces sobre vialidades de doble sentido o con carril de contraflujo que sí cuentan con separación: 53% Cruces sobre vialidades de sentido único: 21%
Paso de cebra	En 38% de los cruces, el paso de cebra no está marcado en parte o en su totalidad En 41% de los cruces, el paso de cebra no se ve bien y falta de mantenimiento En 21% de los cruces, el paso de cebra está bien marcado y se ve
Raya de alto	En 22% de los cruces la raya de alto no está marcada En 53% de los cruces la raya de alto no se ve bien y falta de mantenimiento En 21% de los cruces la raya de alto está bien marcada (4% de los cruces: no aplica)

Flechas de dirección	En 50% de los cruces las flechas de dirección no están marcadas En 34% de los cruces las flechas de dirección no se ven bien y faltan de mantenimiento En 16% de los cruces las flechas de dirección están bien marcadas
Tiempo de espera antes de cruzar	En 61% de los cruces las personas tienen que esperar demasiado tiempo para cruzar la calle (61 segundos o más) En 39% de los cruces la gente tiene que esperar un tiempo correcto antes de cruzar la calle
Tiempo suficiente de cruce	En 67% de los cruces la gente no cuenta con tiempo suficiente para cruzar la calle En 33% de los cruces las personas sí cuentan con suficiente tiempo para poder cruzar la calle
Vuelta a la derecha/izquierda	38% de los cruces evaluados eran cruces sin vuelta a la derecha De los cruces con vuelta a la derecha/izquierda sólo 17% contaban con control semafórico De los cruces con vuelta a la derecha/izquierda 83% no contaban con control semafórico
Semáforo vehicular	3% de los semáforos vehiculares no estaban en funcionamiento 97% de los semáforos vehiculares sí estaban en funcionamiento
Semáforo peatonal	68% de los cruces no tienen semáforo peatonal en uno o ambos lados del cruce En 9% de los cruces el semáforo peatonal no está en funcionamiento o está en la ubicación incorrecta 23% de los cruces cuentan con dos semáforos peatonales bien ubicados

Fotografías por tipos de obstáculos

Obstáculos fijos: Tipos de obstáculos: Postes de luz, señales de tránsito, casetas telefónicas, postes cámara C5, árboles, jardineras, bolardos, botes de basura, rejas, postes de semáforo, letreros del metro, luminarias, postes de trolebús, puestos comerciantes fijos, etcétera.



Puestos fijos

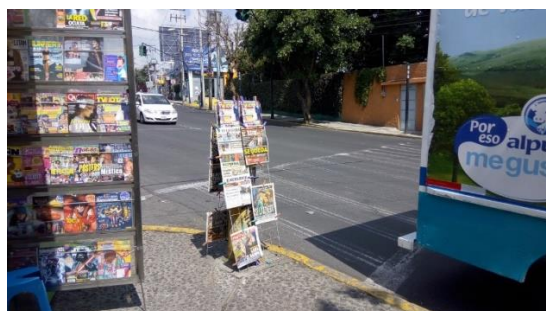


Postes de luz

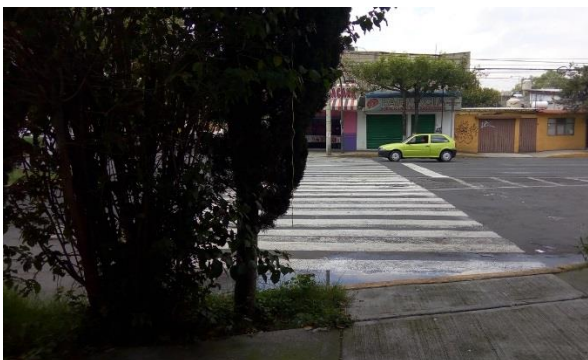
Obstáculos móviles: puestos de comercio ambulantes y semifijos, vehículos estacionados sobre el arroyo vehicular (particulares o taxis), vehículos estacionados sobre la banqueta, letreros de locales, vehículos abandonados, macetas, etcétera.



Puestos ambulantes



Obstáculos que obstruyen la vista: puestos de comerciantes fijos y semifijos, postes de luz, árboles sin podar, letreros de señalización, vehículos estacionados en banqueta o arroyo, jardineras, base de transporte público.



Árboles

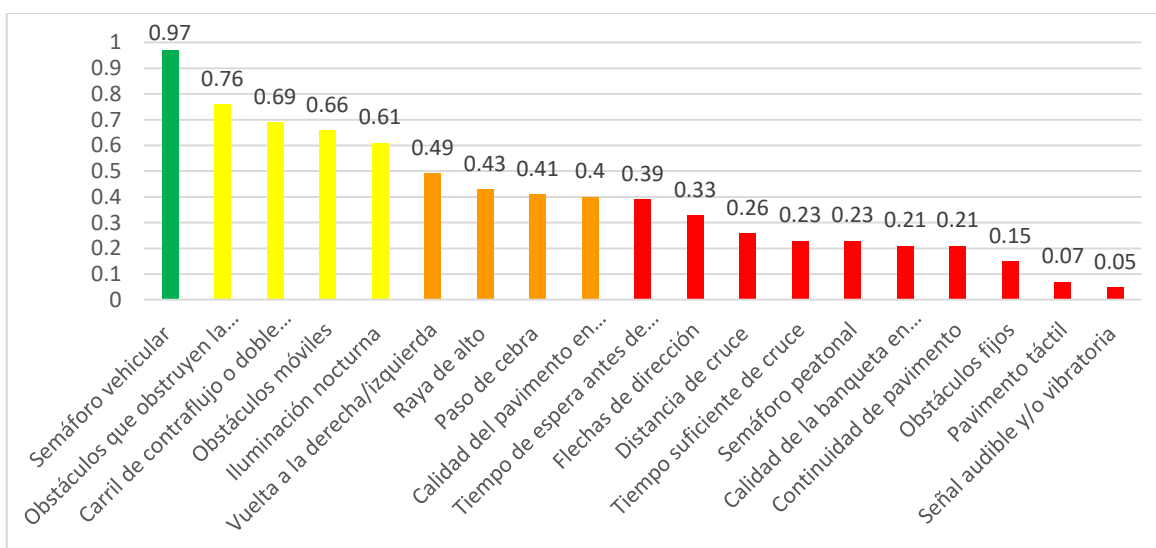


Puestos fijos



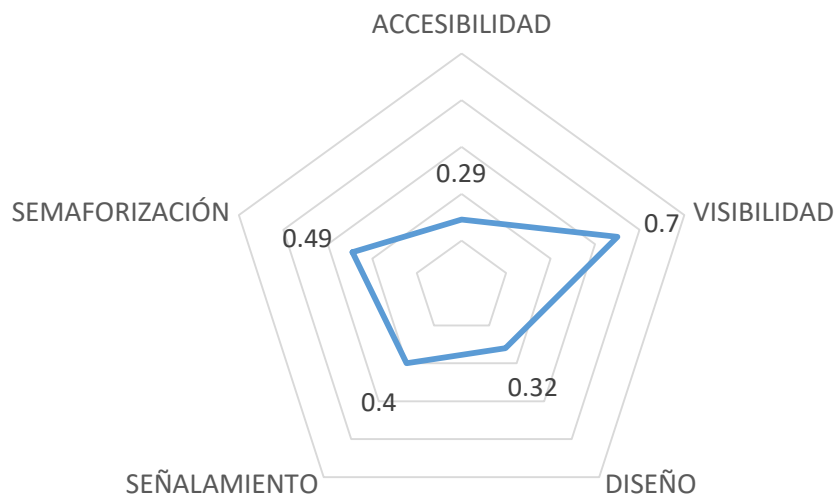
Puestos ambulantes

Figura 21. Valores del ISCP por microcriterio



Esta gráfica es particularmente interesante, porque muestra la calificación de los cruces peatonales por cada microcriterio. Se aprecia que la única variable que fue calificada como de *muy buena calidad* es la relativa al *semáforo vehicular*. Ello implica que en casi todos los cruces los semáforos vehiculares se encontraban en funcionamiento. Sin embargo, los restantes 18 criterios evaluados están calificados por debajo calidad regular, siendo los mayoritarios los calificados por debajo del umbral de baja calidad.

Figura 22. Valores del ISCP por macrocriterio



De la figura 22 podemos inferir que las variables agrupadas en el macrocriterio de *visibilidad* son las mejores evaluadas. Ello obedece no solo al menor número de variables incluidas dentro de este macrocriterio, sino a su alto valor registrado, el cual puede ser apreciado en la figura 23. El peor grupo evaluado fue el de *accesibilidad*, el cual incluye variables relativas al uso de cruces por personas con capacidades diferentes. Al no contar casi ningún cruce con estas características, el valor general se desplomó frente a los otros macrocriterios. La figura 23 consigna que en promedio, los 503 cruces evaluados estarían catalogados como de *muy mala calidad*. Ello puede apreciarse también en la infografía (ver archivo digital Anexo A).

Cuadro 10. Tabla con valores parciales por micro y macrocriterio

Valor de los macroindicadores (promedio ponderado)	Indicadores	Valor de los indicadores (promedio no ponderado)
ACCESIBILIDAD 0.29	Señal audible y/o vibratoria	0.05
	Pavimento táctil	0.07
	Calidad de la banqueta en área de espera peatonal	0.21
	Calidad del pavimento en área de cruce peatonal	0.40
	Obstáculos fijos	0.15
	Obstáculos móviles	0.66
VISIBILIDAD 0.70	Iluminación nocturna	0.61
	Obstáculos que obstruyen la vista	0.76
DISEÑO 0.32	Continuidad de pavimento	0.21
	Distancia de cruce	0.26
	Carril de contraflujo	0.69
SEÑALAMIENTO HORIZONTAL 0.40	Paso de cebra	0.41
	Raya de alto	0.43
	Flechas de dirección	0.33
SEMAFORIZACIÓN 0.49	Tiempo de espera antes de cruzar	0.39
	Tiempo suficiente de cruce	0.33
	Vuelta a la derecha/izquierda	0.49
	Semáforo vehicular	0.97
	Semáforo peatonal	0.23
VALOR PROMEDIO DE LOS 503 CRUCES EVALUADOS: 0.42		

5. Discusión

Este trabajo de investigación derivó en la creación de un ISCP para evaluar la calidad y seguridad de cruces peatonales en Ciudad de México, con la intención de sentar una base para futuras políticas públicas.

El primer hecho a resaltar es que esta herramienta resultó ser muy útil para jerarquizar las condiciones de paso de los cruces, con el objetivo de que las autoridades correspondientes puedan mejorar la infraestructura de manera prioritaria mediante la identificación de los criterios peores calificados. Al ser una herramienta de aplicación en campo cuyo objetivo prioritario es obtener una visión general del estado de los cruces, se omitieron algunas medidas cruciales para la generación de modelos predictivos en aras de un levantamiento en campo más expedito. Para medir las

variables omitidas adecuadamente, se requeriría más tiempo en campo como mayores recursos (i.e. aforo, velocidades, idiosincrasia), lo que pondría en riesgo la viabilidad de aplicación de este índice.

El segundo elemento a resaltar es que el método AHP, al ser uno de índole subjetiva, dificulta la utilidad del índice como modelo de orientación predictiva. Basile *et al.* (2010) consignan en su trabajo que el índice que ellos desarrollaron ha sido utilizado profusamente en ciudades europeas, aun cuando no encontramos seguimiento a su aplicación ni tampoco documentos que validaran su utilización (por ejemplo, reportes *a posteriori* de su aplicación y la reducción de hechos de tránsito). Pero suponiendo que haya tenido éxito, parece que hay un elemento fundamentalmente diferente entre esos países y México: la idiosincrasia. En México, hay una violación constante del reglamento de tránsito por parte de los conductores de vehículos motorizados y, por otra parte, los peatones no siempre cruzan en los espacios designados para ello. Este hecho puede constituir un elemento crucial para la utilización de una metodología que puede funcionar en otras latitudes donde hay un mayor cumplimiento de la norma.

Dado lo anterior, se deriva de esta investigación que el propio valor del ISCP no se correlaciona de manera significativa y coherente con el número de hechos de tránsito (ver figura 18). Ello puede deberse, además de la anterior condición de subjetividad en la construcción del propio ISCP anteriormente señalada, a 1) la falta de precisión de registro del hecho de tránsito por parte de las autoridades, quienes registran los hechos en intersecciones de calles y no en puntos geográficos específicos; 2) la no consideración en el modelo de criterios medibles pero no contemplados en este trabajo, como la velocidad o el aforo; y 3) el no tomar en cuenta la ya señalada idiosincrasia del conductor y del peatón; y 4) el confrontar directamente el ISCP con hechos de tránsito y no con una tasa que dé cuenta de las dinámicas en términos de probabilidad de que ocurra el evento (a pesar de que en realidad sí se confrontó el propio ISCP con una tasa basada en el número de atropellamientos / número de habitantes + número de trabajadores, quizás se debe de trabajar más en especificar una tasa más compleja).

Sin embargo, mediante otros métodos de modelaje estadístico, fue posible modelar con éxito relativo la relación entre algunas de las variables (criterios) que conforman el índice y los propios hechos de tránsito. En algunos casos, se observa una coherencia teórica; en otros se observan relaciones contra intuitivas, pero explicables a la postre.

Nuestro modelo explicativo más potente alcanza una explicación de la varianza cercana a 63%, mientras que el desarrollado por Carter *et al.* (2006) alcanza una $R^2=.83$. Parte importante del poder explicativo del modelo norteamericano proviene directamente de 1) la variable de la existencia de suelo comercial (como *proxy* de cantidad de flujo) y 2) la velocidad sobre las vialidades en los puntos de conflicto. Por ello, suponemos que un camino sensato para robustecer el modelo predictivo sería la inclusión de estas variables. Al momento de la redacción de este reporte, ya hemos entablado

conversaciones con compañías productoras de este tipo de datos, esperando puedan concretarse los acuerdos y mejorar el modelo.

6. Conclusiones

El método AHP, como insumo para el desarrollo de un ISCP, parece ser adecuado para el objetivo de mejoramiento de la calidad de cruces peatonales, pero no tanto para el desarrollo de modelos predictivos.

El desarrollo y aplicación en campo del ISCP en una muestra de N=503 cruces, permitió apreciar el estado general de los cruces peatonales en Ciudad de México, resaltando que más de 93% de los cruces peatonales en Ciudad de México no cuentan con las condiciones mínimas en materia de estándares de diseño. En su conjunto, los cruces evaluados en la muestra alcanzan una puntuación del ISCP de 0.41, correspondiente a una muy baja calidad (ver prototipo de infografía en archivo digital Anexo A). Del estudio cualitativo, destaca que 95% de los cruces no son aptos para personas con discapacidad visual; que 81% de los cruces tienen obstáculos fijos en su trayectoria; que en 74% de los cruces la distancia de cruce es demasiado larga; que 77% de los semáforos no dan tiempo suficiente para cruzar la calle; o que en 61% de los cruces los peatones deben de esperar demasiado tiempo antes de poder cruzar la calle.

Con base en el análisis estadístico, pudo confirmarse que la variable de mezcla de uso del suelo / presencia de uso comercial, como *proxy* de presencia de grandes cantidades de flujos —tanto peatonales como automotores— es una de las variables independientes con mayor poder explicativo en los hechos de tránsito. Dado el enfoque norteamericano de tomar no solo los hechos de tránsito sino los potenciales conflictos (aun cuando no deriven en atropellamiento), se plantea la necesidad de modelar con base en probabilidades y, sobre todo, contabilizando en la medida de lo posible, conflictos además de los propios atropellamientos.

Finalmente, vale la pena destacar el hecho altamente llamativo sobre que la variable ***distancia de cruce***, ponderada en el taller con expertos como la variable de mayor importancia sobre todas las 18 restantes (ver figura 8), es la misma variable que, en los modelos sin la incorporación de la mezcla de uso del suelo, aparece tanto en los modelos inflados por cero como en árboles de decisión, como la variable explicativa más importante para predecir hechos de tránsito. Y esto no es efecto directo de la ponderación de expertos, dado que los modelos predictivos no utilizaron la ponderación sino los valores absolutos. En este sentido, podríamos especular sobre que los gobiernos locales deben poner especial atención sobre ejes viales y arterias de comunicación de alto flujo, alta velocidad y gran envergadura.

7. Referencias Bibliográficas

- Basile, O., Persia, L., y Usami, D. (2010). A methodology to assess pedestrian crossing safety. *European transport research review*, 2(3), 129-137.
- Bian, Y., Jian, L., y Zhao, L. (2013). Method to determine pedestrians level of service for unsignalized intersections. *Applied Mechanics and Materials*, 253, 1936-1943.
- Cafiso, S., Garcia, A., Cavarra, R., y Rojas, M. (2010). Pedestrian crossing safety improvements: Before and after study using traffic conflict techniques. En *4th International Symposium on Highway Geometric Design* Polytechnic University of Valencia Transportation Research Board, 2-5.
- Cameron, A., y Pravin, K. (1998). *Regression Analysisi of Count Data*. Nueva York: Cambridge Press.
- Carter, D., Hunter, W., Zegeer, C., Stewart, J., y Huang, H. (2006). *Pedestrian and bicyclist intersection safety indices* (No. FHWA-HRT-06-125).
- Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199-219.
- CONAPRA. (2013). *Tercer informe sobre la situación de seguridad vial*. México: Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes.
- Cheng W, Zhang N, Li W, y Xi J. (2014). Modeling and Application of Pedestrian Safety Conflict Index at Signalized Intersections. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 1-6.
- GDF. (2015). *Pasos Seguros*. México: Gobierno del Distrito Federal.
- IIHS. (2000). Special Issue: Urban Crashes. *Status Report*, 35(5). Recuperado de <http://www.iihs.org/iihs/sr/statusreport/article/35/5/3>
- IBM. (2018). Recuperado de https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSLVMB_22.0.0/com.ibm.spss.statistics.help/spss/tree/idh_idd_treogui_main.htm
- Montella, A., Mauriello, F., y Eng, P. (2010). Pedestrian crosswalks safety inspections: safety assessment procedure. In *4th International Symposium on Highway Geometric Design*, TRB, 1-17.

- Malczewski J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. Nueva York: J. Wiley & Sons.
- INEGI. (2014). Base de datos de accidentes de tránsito terrestre en zonas urbanas y suburbanas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/registros/economicas/accidentes/default.aspx>
- OPS. (2016). *La seguridad vial en la región de las Américas*. Washington, D.C: Organización Panamericana de la Salud: Organización Mundial para la Salud en las Américas. Recuperado de <http://iris.paho.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/28565/9789275319123-spa.pdf?sequence=6>
- Pérez-López, R. (2014). Movilidad cotidiana y accesibilidad: ser peatón en la ciudad de México. *Cahiers du CEMCA*, 2014(1), 1-2.
- Pérez-López R. (2015). Quand le piéton défie la ville: traverser la chaussée à Mexico. *Environnement Urbain*, 2015(9), 1-27.
- Phillips, N., Neth, H., Woike, J., y Gaissmaier, W. (2017). FFTrees: A toolbox to create, visualize, and evaluate fast-and-frugal decision trees. *Judgment and Decision Making*, 12(4), 344.
- Saaty T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- SEDUVI. (2007). *Manual Técnico de Accesibilidad*. México: Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Richards, D. (2010). *Relationship between speed and risk of fatal injury: pedestrians and car occupants*. Londres, Department for Transport.
- Zeileis, A., Kleiber, C. y Jackman, S. (2008). Regression Models for Count Data in R. *Journal of Statistical Software*, 27(8), 1-25.

8. Trabajo actual de difusión de Resultados

Como obligación de trabajo con **Fundación Mapfre España**, nos comprometimos a generar una plataforma digital donde se presentaran los resultados más relevantes de la investigación, con una redacción orientada a la difusión de las ideas a un público más amplio.

En este sentido, el estado del avance al momento de la entrega de este Reporte Final es la elaboración del contenido de la plataforma (ver Anexo B), la elaboración de una infografía resumen cualitativa de los cruces (anexo A), y la programación base de lo que será la Plataforma Digital.

En archivo anexo (C), puede observarse el artículo original de investigación, sometido para dictamen a la revista “Revista Panamericana de Salud Pública” (<https://www.paho.org/journal/>) perteneciente a la Organización Mundial de la Salud y con un factor de impacto H de 47 (<http://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=22604&tip=sid&clean=0>) , esperando sea publicado el artículo con permiso de la Fundación Mapfre España. En dicho manuscrito se hace referencia explícita al financiamiento recibido por Fundación Mapfre España, por lo que esperamos resolver a la brevedad (en caso de ser aceptado el artículo) el permiso por parte de la Fundación para ser publicado.

Este Reporte Final contiene, en una versión más extensa y detallada, lo reportado en el artículo sometido a la revista indizada. Por ello, esperamos (de ser posible) nos brinden un tiempo razonable para esperar si este artículo es dictaminado favorablemente, para evitar problemas de originalidad.

En lo que respecta a la plataforma digital, se plantea que contenga ligas tanto al Reporte Final como al artículo (si es que es aceptado). Se pueden apreciar algunos avances (capturas de pantalla) de la plataforma en anexo P.

Adicionalmente (y como se comentó en el reporte 2), se sometió la investigación a un congreso en Korea (ver anexo D) para ser presentado como poster. Ha sido aceptado para su exposición, por lo que procederemos en estos días a pagar el registro al congreso a cuenta de los recursos del proyecto MAPFRE España, y esperando sean otorgados los recursos remanentes de finiquito de proyecto para sufragar los gastos de viáticos (hotel, comidas y avión) que incurriremos para presentar los resultados (Ver anexo E).