

Public Transport Modeling with Implementation of the LRT at Carrera 7, Bogota, Colombia

Hernán Carvajal-Osorio, Ph.D.¹, Edwin J.E. Velasco, Ing. Civil¹, and Martín F. Valdés, Ing. Civil¹

¹Universidad La Gran Colombia, Colombia, hernan.carvajal@ugc.edu.co, edwin.velasco@ugc.edu.co,
martinfelipe77@hotmail.com

Abstract- As a contribution to mobility in Bogota, Colombia, this research applied computerized modeling techniques to study how to improve public transportation by implementation of an intended light train (LRT) system along the important Carrera 7 avenue; this in consideration of its particular space limiting conditions. Using specialized software: firstly, with TransModeler, transit flow conditions were simulated in Carrera 7, between 34th and 53rd streets, intersections included, to determine possible traffic interferences with the supposed light train operation; secondly, a particular LRT train station, with an elevated waiting platform, was conceptually designed and modelled in a render format, adapted to the narrowest street section and with minimum lateral traffic interference. Carrera 7's main problems of heavy traffic and congestion (producing high air pollution), together with its reduced physical space, cause a deficient public transportation service, with serious difficulties for implementation of the conventional TransMilenio, a BRT system. The results showed LRT operation possible in the sector under study, even in its limiting conditions and with no need of costly private property acquisitions; however, traffic interferences at intersections became evident. Being computerized modeling usefulness realized, it was recommended to continue studies for proposals to reduce LRT interferences with other vehicle transit.

Keywords: Light train, LRT, public transportation, render, transport system simulation.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.353>

ISBN: 978-0-9822896-9-3

ISSN: 2414-6390

Modelación en Transporte Público con Tren Ligero LRT en la Carrera 7, Bogotá, Colombia

Hernán Carvajal-Osorio, Ph.D. ¹, Edwin J.E. Velasco, Ing. Civil ¹, Martín F. Valdés, Ing. Civil ¹

¹Universidad La Gran Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá., Colombia, hernan.carvajal@ugc.edu.co, edwin.velasco@ugc.edu.co, martinfelipe77@hotmail.com

Resumen- Como aporte a la movilidad en la ciudad de Bogotá, Colombia, esta investigación aplicó herramientas computacionales de modelación a la supuesta operación de un sistema de transporte masivo tipo tren ligero (LRT) en la importante vía Carrera 7a, adaptado a las características particulares de espacio limitado de esta arteria vial. Por medio de software especializado, primero, se modeló el tráfico en el tramo de la Carrera 7ª entre Calles 34 a 53, incluidas las intersecciones principales para determinar posibles interferencias de la operación del LRT, empleando el programa TransModeler y, segundo, se completó diseño conceptual y simulación en render de estación especial con plataforma de espera elevada, en sitio escogido como el más angosto del sector estudiado y con reducida interferencia con el tránsito vehicular paralelo. Los problemas de dicha avenida, de alto flujo vehicular y congestión (con alta contaminación) y espacios estrechos, contribuyen a las deficiencias del transporte público, con intentos fallidos de implementación del TransMilenio convencional, sistema tipo BRT. El resultado mostró como viable el funcionamiento del LRT en las condiciones limitantes de la Carrera 7ª, aunque con afectación del flujo vehicular principalmente en las intersecciones, pero sin necesidad de afectar predios aledaños con valioso patrimonio inmobiliario. Se demostró así la utilidad de la modelación sistematizada, y se recomendó continuar estudios de mejoramiento de las intersecciones para reducir interferencias del tren con el flujo vehicular normal.

Palabras Claves: LRT, Modelación de transporte público, simulación en render, tren ligero.

Abstract- As a contribution to mobility in Bogota, Colombia, this research applied computerized modeling techniques to study how to improve public transportation by implementation of an intended light train (LRT) system along the important Carrera 7 avenue; this in consideration of its particular space limiting conditions. Using specialized software: firstly, with TransModeler, transit flow conditions were simulated in Carrera 7, between 34th and 53rd streets, intersections included, to determine possible traffic interferences with the supposed light train operation; secondly, a particular LRT train station, with an elevated waiting platform, was conceptually designed and modelled in a render format, adapted to the narrowest street section and with minimum lateral traffic interference. Carrera 7's main problems of heavy traffic and congestion (producing high air pollution), together with its reduced physical space, cause a deficient public transportation service, with serious difficulties for implementation of the conventional TransMilenio, a BRT system. The results showed LRT operation possible in the sector under study, even in its limiting conditions and with no need of costly private property acquisitions; however, traffic interferences at intersections became evident. Being computerized modeling usefulness realized, it was recommended to continue studies for proposals to reduce LRT interferences with other vehicle transit.

Keywords: Light train, LRT, public transportation, render, transport system simulation.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación desarrolló, por medio de modelación sistematizada, el estudio de características y condiciones requeridas en la implementación de un sistema férreo de transporte masivo tipo tren ligero LRT (por sus siglas en inglés de: *Light Rail Transit*) en la ciudad de Bogotá, específicamente acondicionado a las condiciones especiales de la Carrera 7ª. Esta avenida fue seleccionada por su importancia como arteria vial de la Capital, con alto flujo de vehículos particulares, oficiales y de servicios, atendiendo a sectores comerciales, financieros, educativos, de salud y residenciales, como parte del denominado corredor oriental que recorre de sur a norte la Ciudad en toda su extensión con la máxima demanda de transporte público [1]. Sin embargo, presenta alta congestión y contaminación por las emisiones vehiculares, a la vez, con limitaciones espaciales que dificultan la implementación de un sistema de transporte público efectivo, tema central de este proyecto.

En vista de lo anterior, se identificaron ciertas particularidades de la Carrera 7ª, que este proyecto asumió como puntos clave para el desarrollo de varias ideas de solución, en especial para esta investigación, lo relacionado con la estrechez de la vía, con seria limitación para su ensanchamiento, como se explica más adelante. Ya la Alcaldía de Bogotá desde 2011 había propuesto convertir dicha avenida en un corredor verde [2], presentando como una de las alternativas la implementación del LRT, como elemento central de transporte masivo [3]. Adicionalmente, desde 2012 la Alcaldía propuso una red de cerca 80 km de trenes ligeros para la Ciudad, además de la primera línea del metro [4]; ésto en atención a planes nacionales y locales de reducción de emisiones, en revisión actual por parte de la reciente administración local en ejercicio (desde enero 2016).

La Carrera 7ª o Avenida Alberto Lleras Camargo, objeto de esta investigación, tiene un carácter emblemático para la Ciudad por su valor histórico y cultural, contando con edificaciones de alto valor tanto antiguas, como modernas de altura. La existencia de este patrimonio arquitectónico limita el ensanchamiento de calzadas (actualmente con seis carriles) y andenes, más para introducir vías expresas de transporte

público, como se ha querido (ver Gráfica 1). Esto exige un diseño acorde del sistema de transporte por esta avenida, como aquí se presenta en resultado de la investigación.



Gráfica 1. Vista panorámica (hacia el norte) de la Carrera 7ª – parte del tramo en estudio, mostrando intersecciones de Calles 37 y 38. Fuente: Google Earth

Este artículo presenta la metodología aplicada con base en modelación sistematizada realizada con *software* especializado, tanto para el análisis de tráfico en interacción con la infraestructura del tren ligero previsto, como para el diseño conceptual de una estación de abordaje especial que garantice el acceso en un sitio angosto de la vía. El estudio se limitó al sector de la Carrera 7ª entre Calles 34 y 53, uno de los más críticos por falta de espacio y alta demanda de pasajeros de transporte público.

La investigación fue motivada por la urgente necesidad de propuestas válidas de solución a la deteriorada de movilidad de Bogotá, que se complica cada vez más por una población urbana creciente ya cercana a los ocho millones de habitantes, que demanda transporte masivo para atender más de doce millones de viajes diarios, de los cuales el 41 % se hace en transporte público colectivo. La movilización en vehículos privados está por debajo del 15% [5], [6], con un índice de motorización bastante bajo todavía, ya que el 70% de los hogares colombianos no poseen vehículo [7].

Sin embargo, a pesar de los numerosos estudios y discusiones sobre la movilidad en la Carrera 7a, no se han dado todavía soluciones satisfactorias, mientras crecen población, número de vehículos en circulación, índices de

accidentalidad y contaminación, en medio de la congestión y poco orden en el tráfico, con falta de vías adecuadas. La introducción en Bogotá, desde el año 2000, del TransMilenio (TM), sistema tipo BRT (por sus siglas en inglés de *Bus Rapid Transit*), si bien ha significado una mejora importante del transporte público de la Ciudad, en atención actualmente del 43 % de la demanda de transporte público [8], ya muestra saturación y muy alta congestión por su insuficiencia. Recientemente se viene consolidando el sistema integrado de transporte público – SITP, con buses en vías mixtas, al tiempo que se implementan algunas rutas del TM en la Carrera 7ª, con carriles exclusivos y servicio de buses articulados e híbridos.

El problema de la Carrera 7ª de limitación de espacio físico, se hizo evidente cuando se quiso implementar en esta vía el sistema TM tradicional, con carriles expresos segregados para los buses y con sobrepaso en estaciones, lo cual obligaría ejecutar obras costosas y ampliación de la vía en varios puntos [9], contrariado la conservación del patrimonio arquitectónico de esta avenida, además de los altos costos de los predios. La Alcaldía de ese entonces (en 2010), buscando reducir costos y estimando una menor demanda al considerar una próxima entrada en funcionamiento del metro (todavía lejana), intentó implementar lo que se denominó “Transmilenio ligero”, el cual en varios trayectos tendría paraderos en los costados de la vía sobre las aceras y sin sobrepaso en las estaciones, con restricción importante del tráfico mixto; sistema que no tuvo buena aceptación y, finalmente, el contrato de construcción fue suspendido en sus inicios.

La opción del tren ligero tipo LRT, que por características propias requiere menor anchura de vía (al transitar guiado sobre rieles), permite aprovechar esta condición para obviar en parte las limitaciones espaciales, además de sus otras ventajas en el campo energético y ambiental [10], [11], aspectos centrales de este proyecto. Esto también atiende uno de los problemas serios en la Capital, y específicamente en la Carrera 7ª, cual es la alta contaminación producida casi exclusivamente por las fuentes móviles que queman combustibles fósiles, siendo esto de grave preocupación por sus efectos nocivos en salud. El material particulado emitido por los buses operando con diésel, uno de los contaminantes más peligrosos por su incidencia en afecciones pulmonares graves [12], presenta en varios sitios índices de concentración que sobrepasan los límites permisibles [5], [13]. Al implementarse sistemas eléctricos, como el tren ligero, de casi nula contaminación en el sitio de operación, contribuirían a mejoras sustanciales del ambiente, satisfaciendo así uno de los requisitos más importantes de la sostenibilidad [14], [15]. Actualmente, Medellín es la única ciudad en Colombia que cuenta con dicha tecnología, con un metro y el primer tren ligero, a la par de numerosas ciudades del exterior. Bogotá contó con tranvías a principios del siglo pasado.

El objetivo de la investigación fue determinar la viabilidad de operación del tren ligero en interacción con el flujo vehicular en la zona en consideración sobre la Carrera 7ª, por medio de modelación computarizada tanto del tráfico, como

para diseñar la estación especial con acceso elevado al LRT, ideada para espacios reducidos, a la vez, simulando su operación en un *render*.

El proyecto no comprendió aspectos económicos, ni reglamentarios. La investigación hace parte de los estudios de movilidad urbana sostenible que adelanta la Facultad de Ingeniería de la Universidad La Gran Colombia, Bogotá, con participación de estudiantes de ingeniería civil en el Semillero de investigación VITRA.

Previamente, en otras investigaciones dirigidas por uno de los autores, con aportes de proyectos de grado de estudiantes del Semillero [16], [17], primero, se estudiaron las características viales y geométricas del sector de la Carrera 7ª que, verificados flujos peatonales y vehiculares, permitieron establecer las condiciones del espacio público e identificar los sitios críticos de la vía en cuanto espacio, determinando localizaciones de posibles estaciones del LRT en el sector en estudio. Segundo, identificadas las características técnicas de los sistemas LRT, se desarrolló una primera modelación de diseño esquemático [12] de la estación especial para acceso elevado al LRT, que luego se perfeccionó en este proyecto, asegurando reducida interferencia con el tráfico mixto y localizada en el punto más crítico de la Carrera 7ª en cuanto a espacio disponible.

La Alcaldía de Bogotá, en administración anterior, también consideró, bajo la figura de asociaciones público privadas (APPs) y conjuntamente con el Departamento de Cundinamarca [6], la implementación de dos líneas de tren de cercanías tipo LRT, una hacia al Municipio vecino de Facatativá, al occidente, con servicio también a las poblaciones de Mosquera y Madrid; la segunda línea hasta el Municipio de Soacha (al suroccidente), con alta demanda de transporte hacia el centro y norte de Bogotá.

Los resultados de la investigación que aquí se presentan, pueden ser aplicables, según condiciones en cada caso, a otras rutas posibles del tren ligero en Bogotá o en diferentes ciudades.

II. METODOLOGÍA

Los desarrollos avanzados de los sistemas computacionales (*hardware* y *software*) facilitan considerablemente los procesos de diseños estructurales y de operación de sistemas complejos, con capacidad de simulación que permiten visualizar y validar lo diseñado sobre modelos con representaciones gráficas estáticas y dinámicas con apariencia casi real. La mayor ganancia está en que estos modelos pueden ser manipulados fácilmente para los diferentes análisis del sistema y su comportamiento, facilitando los ajustes y mejoras durante el proceso de desarrollo con solo cambiar ciertos parámetros en el computador.

Esto se ha aprovechado en este proyecto para estudios relacionados con la movilidad en Bogotá, en este caso en aplicación sobre la Carrera 7ª, en consideración a una posible solución de transporte público basado en la posible

implementación del tren ligero, buscando mayor sostenibilidad y mejor calidad de vida [18]. La zona donde se aplicó este trabajo es mostrada en parte en la Gráfica 1. Se pueden observar allí las intersecciones con Calles 37 38 y 39, el Parque Nacional y la Universidad Javeriana (al fondo, lado derecho), así como edificaciones antiguas y modernas a ambos costados, siendo el sitio donde estaría la estación especial frente a la Universidad Javeriana. Puede apreciarse también el importante volumen de tráfico de vehículos de varios tipos.

La investigación se valió de la tecnología informática, aplicando software especializado tanto para micro-simulación de flujos de tráfico, como de modelación con simulación en *render* de la estación especial para acceso elevado al tren ligero en aplicación a las condiciones, a manera de ejemplo, de la Carrera 7ª de Bogotá. El proceso sistematizado facilitó el diseño y permitió ajustes para lograr el propósito de un acceso adecuado al sistema LRT en un sitio crítico de espacio limitado y reduciendo afectación del tráfico vehicular mixto. Esto comprendió dos procesos de modelación diferentes pero complementarios, como se detalla a continuación.

A. *Micro-simulación de tráfico en incorporación del tren ligero por la Carrera 7ª*

Con el propósito de determinar las condiciones del tráfico vehicular en sus diversas modalidades en el trayecto escogido de la Carrera 7ª de Bogotá, sector entre Calles 34 y 53, se realizó la micro-simulación del tráfico tanto de las intersecciones con Calle 39 y Calles 45-46, por ser las principales en el sector considerado, así como del flujo vehicular mixto en sectores contiguos.

Para dicho fin se escogió el *software* TransModeler [19], dada su versatilidad y amplia capacidad, como mejor lo relaciona su fabricante Caliper Corp. [19]: “...Es un potente y versátil paquete de simulación, aplicable a una amplia gama de tareas de planeamiento y modelación de tráfico. TransModeler puede simular toda clase de redes de viales, desde autopistas hasta calles de los centros de las ciudades, y puede analizar redes multimodales de áreas extensas, con gran detalle y fidelidad.” De esta manera se facilitó analizar la situación al integrar el modelo del tren ligero operando en dicha arteria vial, junto con la simulación de los flujos vehiculares.

La micro-simulación consiste en superponer varias capas de componentes del sistema, la primera, representando en un gráfico de nodos sus interrelaciones que sirven de base al modelo; luego se superponen los datos de control de tráfico y operaciones de las relaciones, para agregar otra capa con la demanda de viajes y comportamiento de los viajeros, agregándose finalmente los controles de la operación del modelo. Se agrega el control de aseguramiento de la calidad para reducir posibles errores en la codificación de los datos de entrada. Las variables y parámetros principales comprenden [20], [21]:

- Geometría de las vías con sus intersecciones: distancias, carriles, curvaturas, separadores, etc.
- Controles al tráfico: señales y sus tiempos.
- Demandas de: volúmenes vehiculares que se incorporan a las vías, volúmenes en los cruces, con aplicación de tablas origen-destino (O-D).
- Datos de calibración: conteos de tráfico y desempeños, velocidades.
- Datos sobre tipo de vehículos y comportamiento: aceleraciones, desempeño del conductor (dados por defecto por el programa si no han sido determinados).
- Parámetros de control que especifican cómo el modelo ejecutará la simulación de acuerdo al caso específico: tiempos de simulación, selección de datos de salida y la resolución deseada de los resultados.

Lo anterior exige tener disponible la información requerida, lo cual necesitó realizar mediciones de conteos de tráfico y de saturación del flujo vehicular, lo cual se verificó en trabajo de campo de los estudiantes del Semillero; también, para la determinación del desempeño del sistema, esto es, tiempos de viaje, velocidades, retrasos y longitudes de colas. La inspección visual del sitio en estudio es fundamental para reconocer características de la vía y las intersecciones, útil también para descubrir errores en la verificación del modelo. También debe tenerse en cuenta el comportamiento del conductor (esto es, distancia entre vehículos, espacio para cambios de carril, tiempos de respuesta y accionar ante la señal amarilla), pues son condiciones que determinan en gran parte el desplazamiento vehicular. Algunos de estos parámetros se tomaron del programa dados por defecto.

Para aplicar este método con el desarrollo del modelo, antes se conocieron aplicaciones en estudios ya realizados para el Instituto de Desarrollo Urbano - IDU de Bogotá, en diseño de intersecciones de la Avenida Calle 26, (en Fase IV del TransMilenio) [22], y por la Alcaldía de Medellín (en implementación de la primera línea de tren ligero del país), así como uso del TransModeler en Bucaramanga [23], para diseño de una intersección tipo diamante de dos importantes arterias de esa ciudad.

B. Simulación con el Programa TransModeler

En mayor detalle, el *software* TransModeler utiliza técnicas sistematizadas para simulación de sistemas viales en áreas geográficas que se definen gracias a su enlace con sistemas de información geográfica (SIG). La simulación puede ser conjunta o separada en los niveles micro-, meso- y macroscópica [19]. En la primera, el programa simula el comportamiento de cada vehículo, incluyendo aceleración y desaceleración, intervalo entre vehículos, cambios de carril y confluencias de flujos vehiculares, dependiendo de la geometría de la vía. El programa puede hacer asignación dinámica de tráfico según tablas O-D, desarrollando datos sobre tiempos de viajes, así como las trayectorias de los vehículos en seguimiento a información externa o ejecutando asignaciones. En la simulación mesoscópica, los vehículos

pueden agruparse por celdas y corrientes de tráfico, basándose en capacidades de la vía y funciones de velocidad-densidad predefinidas. Con el simulador a nivel macroscópico de redes viales urbanas, se modela en base a demoras y volúmenes de tráfico según la clasificación de las vías, opción esta última no utilizada en esta ocasión.

El programa, al examinar las restricciones de capacidad y el efecto de las colas, puede incorporar estrategias de derecho preferente para el transporte público, opción que aquí se empleó para operación del tren ligero, además del comando de los semáforos dentro de ciertos límites, para así analizar interferencias de tráfico y sus demoras.

Las simulaciones con TransModeler comprendieron: demoras por vehículo, paradas, colas, velocidades promedio y niveles de servicio que se presentan en cada uno de los tramos de vía en consideración y las que confluyen en las intersecciones, como el caso en estudio de la Carrera 7a. Estos resultados fueron aprovechados para proponer optimización de la operación semafórica de acuerdo a las condiciones de la vía y la demanda, tanto antes como después de la entrada en operación del tren ligero.

Dicho potencial de simulación permitió la determinación y análisis del comportamiento del tren en coexistencia con el flujo mixto y de las posibles interferencias mutuas del tránsito transversal a la línea férrea en las intersecciones, dando como resultado el posible efecto sobre el tráfico vehicular y sobre la operación del tren mismo al suponer su implementación en la Carrera 7a.

C. Modelación (con renderización) de la estación especial de acceso elevado al sistema LRT.

La modelación gráfica en 3D aplicada en este caso fue con el desarrollo del denominado *render* (término en inglés), con lo cual se generan imágenes tanto estáticas como en animación, con el grado de sofisticación deseado. Se basa inicialmente en cálculos de iluminación y texturizado según los materiales empleados, aplicados a una matriz que contiene toda la información geométrica del dispositivo o sistema en modelación y de los alrededores [20]. Partiendo de bocetos muy básicos (figuras simples en 3D, como cubos, esferas y otras superficies en perspectiva) y un esquema del sistema a trabajar que se suministra al programa, el proceso de renderización genera modelos detallados del diseño y su funcionamiento que dan la sensación de realismo de acuerdo al grado de complejidad deseado. En este caso, este proceso se empleó para concretar el diseño conceptual y simulación de la operación parcial de la estación especial concebida para el sitio más limitado en espacio de la Carrera 7ª (que se identificó entre Calles 40 y 43 [17]).

La Fig.1 muestra en detalle la secuencia del software especializado utilizado para el diseño y obtención del *render*,

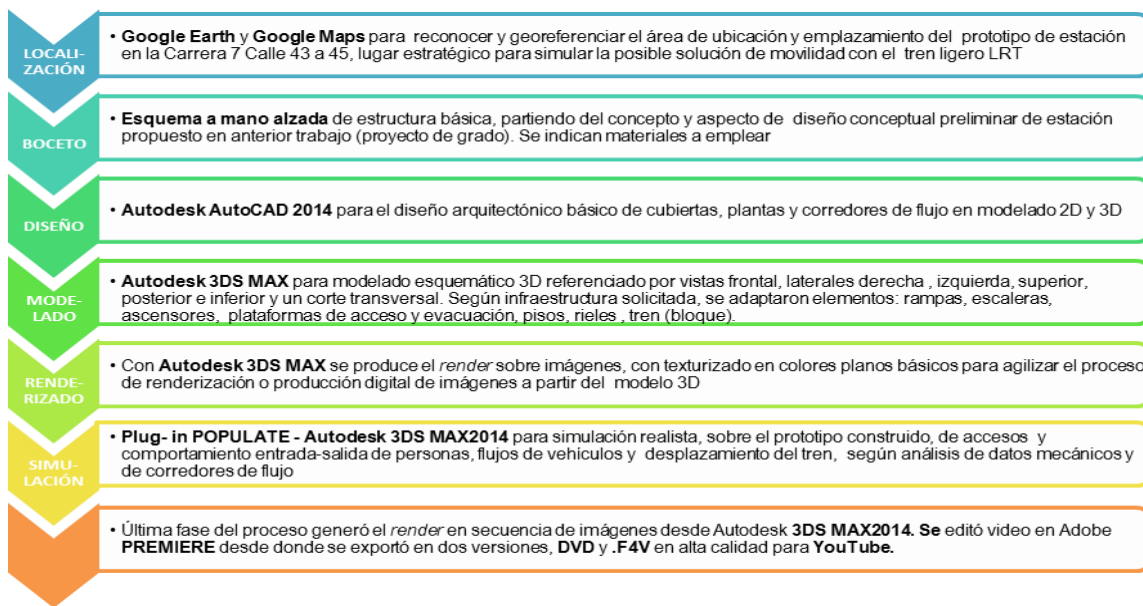


Figura 1. Etapas con el *software* utilizado para la modelación en *render* de la estación especial de abordaje del tren ligero, con plataforma de espera elevada. Fuente: elaboración propia.

simulando la estación, su función y el entorno. Se inicia con determinación de localización con ayuda de herramientas Google y la introducción del esquema básico. Luego entran los programas de Autodesk [24] para crear y preparar la escena con una geometría muy básica, a la vez indicando materiales (metal, papel, plástico, cristal, etc.), así como las texturas deseadas, entre otros parámetros; se agrega iluminación de varias intensidades (en inglés: *radiance*) para aplicar por capas y así iniciar el proceso de renderización, habiendo tenido en cuenta las texturas según materiales y acabados; ésto dispuesto en secuencia de una serie de poligonales que tienen los datos correspondientes que entran a formar cada imagen; esta es colocada sobre una cara o serie de caras del objeto para darle forma. Se termina con los ajustes necesarios en reflejos, profundidad de campo y el nivel del muestreo (número de iteraciones para el cálculo de la luz).

Se realiza con AutoCAD el diseño arquitectónico que se introduce al programa principal AutoDesk 3dsMax [24], el cual inicialmente desarrolla el modelo esquemático para adaptar los diferentes componentes del diseño. Finalmente, el programa Plug-in Populate modela personas y vehículos incluido el tren, de manera que al hacer una secuencia rápida de numerosas imágenes, produce la sensación de movimiento. La visualización final del modelo en 3D se logra con la ayuda del programa Adobe Premier, facilitando su edición para mostrarse en YouTube y en medio óptico (DVD) de respaldo.

La utilización de este *software* especializado para lograr el *render*, por no contar con él en el grupo de investigación, ni la experiencia, se realizó en contratación externa de especialista con las licencias respectivas. El trabajo se basó en los cálculos y detalles suministrados por dos de los autores. Un bosquejo inicial había sido preparado en el Semillero como proyecto de grado bajo la dirección de uno de los autores [16].

El diseño se realizó de acuerdo a normativa local sobre espacio público establecida por la Alcaldía Mayor de Bogotá-IDU [25]. Se utilizaron dimensiones y características de las escaleras eléctricas fueron seleccionadas, a manera de ejemplo, de especificaciones técnicas de fabricante conocido.

III. RESULTADOS

A continuación se detallan los resultados que se lograron, habiendo iniciado el trabajo con el conocimiento del *software* utilizado y sus capacidades, la recopilación y acondicionamiento de la información pertinente, para una vez procesada y analizada en su aplicabilidad, entrar a desarrollar los modelos utilizando el *software* especializado descrito. El procesamiento computacional permitió hacer visible y cualificar tanto el comportamiento simulado de tráfico en el sitio de interés, como el modelo de estación especial y su funcionamiento en el momento de arribo del tren y el abordaje de los pasajeros.

La Gráfica 1 (mostrada arriba) da una vista panorámica de parte del sector de la Carrera 7ª donde se centró el trabajo.

A continuación se explican por separado los resultados de ambas modelaciones, del tráfico y de la estación.

A. Caracterización y modelación de intersecciones

Verificados en trabajo de campo los flujos vehiculares en los puntos de interés, esto es, intersecciones de la Carrera 7ª con Calle 39 y 45-47 (Tabla I), y contando con el diseño geométrico de la vía e intersecciones tomadas de estudios hechos por la Alcaldía de Bogotá [2], se produjo la red de circulación simulada convertida en una capa geográfica de

líneas, con la base de datos de la red de tráfico en el sector considerado.

Con el programa TransCad [24], actuando como estimador de las tablas de viajes, se fijaron los valores de conteos de tráfico que se muestran en la Tabla I, tomados de 6 a 9 de la mañana de un día típico. Los datos se organizaron por los movimientos (giros y cruces de tráfico) señalados con números que corresponden a los indicados sobre las flechas de las Figs. 2(a) y 2(b), que representan ambas intersecciones en estudio. La clave de esta numeración aparece detallada en el cuadro incluido en la misma Fig. 2, para identificar los movimientos correspondientes.

Así se generaron en el *software* TransModeler los códigos de entrada al programa con los conteos respectivos, formando las matrices de viajes sobre demanda en la red en consideración, para uno de los casos mostrada en la Fig. 3. Esto también podría servir, en caso de ser requerido, para establecer un plan de transporte integrado al tren ligero.

TABLA I. CONTEO DE VEHÍCULOS EN INTERSECCIONES DE LA CARRERA 7ª CON CALLE 39 Y CALLES 45 Y 47, [26]

HORA Y DÍA: 6:00am - 9:00am	Mar. 8/13 (vie.)	Acceso
LOCALIZACION	MOVIMIENTO	OESTE
CARRERA 7 X CALLE 39	7	3635
	9(3)	1781
Total		5416
CARRERA 7 X CALLE 45 Y 46	3	2130
	7	3348
	9(3)	832
Total		6310
CARRERA 7 X CALLE 53	3	9049
	7	3156
	9(3)	1509
Total		13714
Total general		25440

^aLa clave para los números dados para cada movimiento, puede verse en la Fig. 2

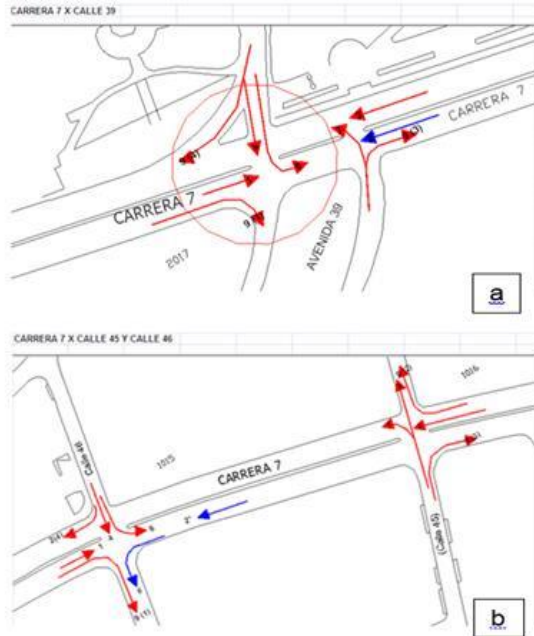
Los modelos creados contienen los tipos y características de los vehículos que fueron identificados en circulación en la Carrera 7ª, superpuestos con las características de las intersecciones y la semaforización con asignación de tiempos.

La simulación así producida por TransModeler muestra los flujos vehiculares con diferenciación de los carros con colores codificados según las velocidades de desplazamiento. Así se pudo analizar en el modelo final de las intersecciones en capacidad, demanda y niveles de servicio de cada una, con los varios cruces vehiculares que allí se da.

El resultado del estudio de la intersección de la Calle 39, la más compleja del sector de la Carrera 7ª en consideración (Fig. 2a), muestra la situación complicada que se genera principalmente por la operación no bien controlada entre los varios semáforos para los varios cruces que allí existen. Un cruce específico, por ejemplo, el giro a la izquierda desde el occidente para tomar la Carrera 7ª hacia el norte, que cuenta con muy poco espacio para la cola de espera al dar vía, se mostró complicando la totalidad de la intersección al obstaculizar los otros movimientos, con tiempos de semaforización inadecuados; lo cual exige su revisión y ajuste acorde con la demanda; más todavía para cuando se introduzca el tren ligero.

Otra de las simulaciones realizadas fue la del tráfico a lo largo de un tramo entre Calles 36 y 39 en el sector en estudio de la Carrera 7a, con una parte del resultado dado por TransModeler mostrando en la Fig. 4 vehículos transitando, con sus características y tasas de entrada y salida de la vía.

La Fig. 4 presenta una secuencia en cuatro cuadros de sendos momentos, con período de 15 minutos, con los vehículos desplazándose en hora de alto tráfico, diferenciando los niveles de congestión y las varias velocidades identificadas por colores (según clave incluida en cada cuadro). En esta secuencia, se pueden apreciar los efectos de un cerramiento parcial simulado sobre la vía sentido sur-norte, donde la simulación muestra la formación de las colas y cómo al final comienza a fluir el tráfico al retirarse el obstáculo, (último cuadro de Fig. 4).



CLAVE		
Acceso	Movimiento	Código
Norte	Directo	1
	Giro a izquierda	5
	Giro a derecha	9(1)
	Giro en U	10(1)
Sur	Directo	2
	Giro a izquierda	6
	Giro a derecha	9(2)
	Giro en U	10(2)
Oeste	Directo	3
	Giro a izquierda	7
	Giro a derecha	9(3)
	Giro en U	10(3)
Este	Directo	4
	Giro a izquierda	8
	Giro a derecha	9(4)
	Giro en U	10(4)

Figura 2. Identificación de flujos vehiculares en las intersecciones de la Carrera 7ª: a) Calle 39 y b) Calles 45 y 46 . (Las flechas más oscuras indican contraflujo de la Carrera 7ª durante ciertas horas, ya no existente). Fuente: propia

Phase Table	1	2	3	4	5
Coordinated	No	No	No	No	No
Recall Mode	Min	None	None	None	None
Min Green	20	7	7	7	7
Added Initial / Actuation	0	0	0	0	0
Max Initial					
Extension	2	2,4	2	3	3
Min Gap					
Max Green	32,9	32,9	22,9	37,9	37,9
Max Inhibit					
Yellow	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Red Clearance	3,5	3,5	3,5	3,5	2
Ped Call/Inhibit	0	0	0	0	0
Ped Time					
Memory Mode	L	L	L	L	L
Detectors	1,2,3,4;...	12,13,1...	5;5	0,9,10;...	6,7;6,7
LEINGTON RD	G/G	R/R	R/R	R/R	R/R
GREENSTEAD RD	R/R	G/G	G/R	R/R	G/G
LEINGTON RD	R/R	G/G	R/R	R/R	R/R
GREENSTEAD RD	R/R	R/R	R/R	G/G	R/R

Figura 3. Matriz (parte) dada por TransModeler en pantalla del PC, con características de vehículos y tasas de entrada/salida, en las intersecciones con Calle 39 y Calles 45-47, incluido el tren ligero. Fuente: propia

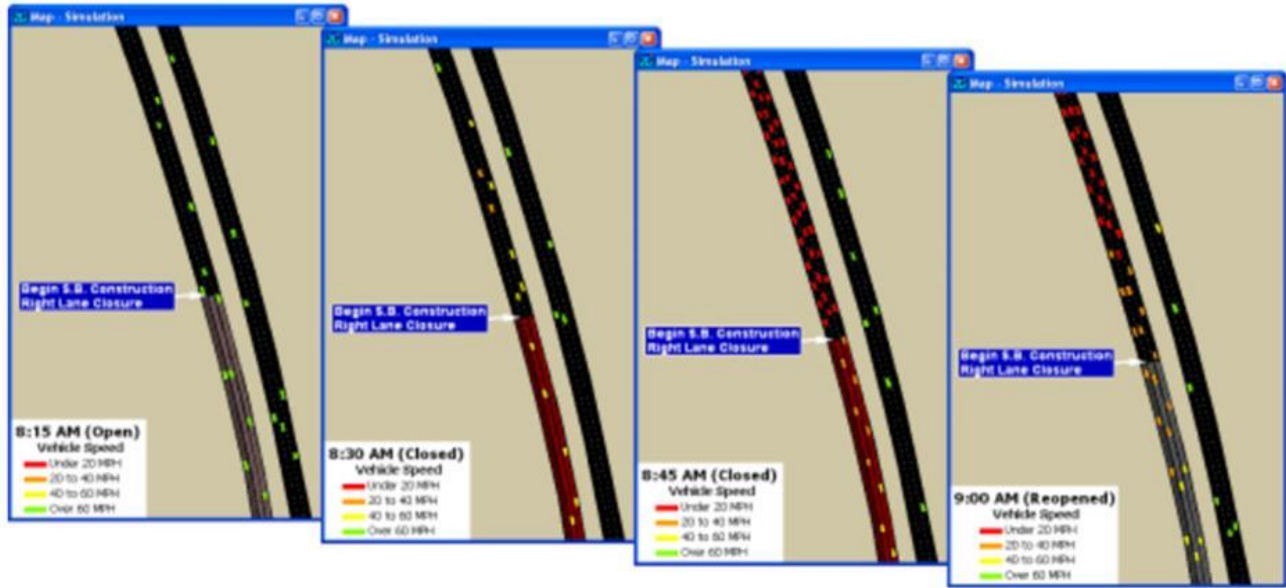


Figura 4. Flujo vehicular con convergencia de distintas clases de tráfico (secuencia de cada 15 minutos), con efecto de cerramiento parcial con identificación de velocidades (por colores). Fuente: Elaboración propia, desarrollo con TransModeler

Para el estudio con tren incorporado en el modelo, primero se simuló la vía antes de introducir el tren, con el flujo de carros particulares y de buses de transporte público recorriendo la Carrera 7ª, mostrando fluidez normal con tres y cuatro carriles libres para tráfico mixto, como se indica en la Fig. 5.



Figura 5. Simulación de TransModeler de flujo de vehículos en arteria vial, con dos carriles centrales para posible uso por el tren ligero.

Fuente: TransModeler

El área que sería ocupada por los rieles del tren (éste todavía no incluido) está representada por dos franjas centrales gruesas, separadas por línea continua de los carriles mixtos (identificadas con la leyenda en inglés: *Lane closed for median work*). En este caso, se aprecia tránsito normal y rápido.

Sin embargo, con dos carriles en cada sentido en vías estrechas, el modelo mostró congestión en hora pico. En el caso de la Carrera 7ª, actualmente con seis carriles, la introducción del tren ligero, si dejara solo dos carriles por

sentido para tráfico mixto, como muestra la Fig. 6 (aparece sólo un tren en sentido hacia el norte), se produciría, según el modelo, fuerte congestión en el sentido hacia el sur en hora pico. Esta situación sirvió para proponer dejar un carril adicional hacia el sur, como se explica más adelante en el análisis de la estación especial, por estar ésta en el punto más crítico en cuanto a espacio disponible.



Figura 6. Simulación resultante al introducir el tren ligero, conjuntamente con flujo vehicular mixto en los dos sentidos, sobre sector de la Carrera 7ª. Fuente: elaboración propia [26]

En el estudio del modelo de las intersecciones, la situación resultante de la interacción con el flujo vehicular, condujo a proponer [27], como primera medida, un replanteamiento de la semaforización, incluyendo su control; más con la posibilidad de establecer el comando de semáforos desde el tren, para dar prioridad de paso, con la ventaja adicional de conseguir operación óptima al hacerse automatizada. También se derivó, para ejecución en investigación posterior, el estudio de pasos elevados del tren sobre varias intersecciones, aprovechando aquellas que presentan perfiles topográficos con hondonadas pronunciadas que facilitarían el sobrepaso del tren con escasa pendiente.

B. Modelación en render de estación especial de acceso elevado

Se planteó como un desafío el desarrollo del diseño a nivel conceptual de la estación especial aplicando la modelación gráfica computarizada, generando una representación gráfica en *render*. De esta forma se hizo visible la operación simulada del tren y de la estación durante el arribo a la estación, su parada y recogida organizada de pasajeros y salida; además, sin afectación grande del tráfico mixto (sin buses ni carga), en circulación en carriles paralelos a las dos vías férreas centrales. También se simuló el movimiento de los pasajeros bajando ordenadamente en escaleras eléctricas sincronizadas con la operación del tren, desde la plataforma de espera en segundo piso, con verificación de tiempos de los movimientos; todo lo cual se puede apreciar en el *render* realizado, disponible en la Web, en: <https://www.youtube.com/watch?v=TlyFOozriCc&feature=youtu.be>.

Se estableció en el modelo un flujo de pasajeros sin dificultad para entrar y salir del tren a través de puertas distintas y utilizando escaleras diferenciadas, además, con tres ascensores para discapacitados, así, evitando aglomeraciones. Se contaría con un total de ocho escaleras, cuatro para cada sentido de viaje, un par para subir y otro para bajar, simultáneamente. El acceso peatonal desde la calle se haría por rampas elevadas sobre la acera a los costados de la avenida. De esta forma, quedó en evidencia (virtual) la funcionalidad y pertinencia del diseño de la estación, con suficiencia de servicio a pesar de lo limitado del espacio.

Gracias a la facilidad de contar con las herramientas de sistematización, se logró el doble propósito con el modelo de la estación especial: primero, contar con una representación simulada muy gráfica en 3D de la estación especial de acceso elevado, con apreciación de los volúmenes y perspectivas del sistema en su entorno, así como mostrando el flujo peatonal, y el vehicular mixto; segundo, permitir, a través del estudio detallado del modelo, complementación y mejoramiento del diseño preliminar, con manejo adecuado de los usuarios, en simultaneidad con la operación del tren en su parada y partida de la estación. Se pudo hacer afinación del diseño, mas no de detalle en estructuras y arquitectura de la estación. Esto abre el camino para investigación posterior, que permita verificar los tiempos de parada del tren y, así, con ensayos de frecuencias

del servicio de acuerdo a la demanda, se establecería más precisamente la capacidad de movilización del sistema de transporte y, por tanto, el flujo de pasajeros a manejar por la estación.

C. Otros resultados del análisis de los modelos con operación del tren ligero

Se evidenció también en el estudio de la intersección con las Calles 45-47 (Fig. 2b), la situación particular del tránsito en parte importante del corredor oriental (que comprende otras carreras paralelas a la Carrera 7ª hasta la Carrera 17), además con acceso a la Avenida Circunvalar (al extremo oriental). Dada la importancia de la zona, con un flujo vehicular bastante alto que se observa en la realidad y se aprecia en el modelo, se genera alta congestión del corredor oriental superando la capacidad de las vías y de la intersección de la Calle 45 con la Carrera 7ª; situación que se agravaría con la operación del tren ligero. Así, el modelo indicó la necesidad primaria de sincronizar semáforos, posiblemente comenzando desde la Carrera 30 (Avenida NQS, hacia el occidente) que se comunica con la Carrera 7ª a lo largo de toda la Calle 45; preferiblemente agregando a ésta al menos un-dos carriles. Afortunadamente, esta ampliación de la Calle 45, desde la Carrera 13 hasta la 7ª, acaba de realizarse, lo cual beneficiaría el proyecto del tren ligero o cualquier otro medio.

El otro aspecto interesante, resultado del análisis conjunto de ambos modelos del tráfico vehicular y de la estación especial, en relación con interferencias entre el tren y el flujo mixto en el sitio de la estación especial, al comparar en la simulación de TransModeler el antes y el después de implementar el tren ligero, se evidenció importante congestión en el sector estudiado de la Carrera 7ª, principalmente hacia el sur (Fig. 6), por reducción de los carriles de los seis actuales a cuatro (total en ambos sentidos) (Fig. 6). En vista de la situación, se decidió plantear otra opción en el número de carriles mixtos en el sitio de la estación, si se quiere evitar hacer ensanchamiento de la Carrera 7ª. Así, ajustando al mínimo de anchura, tanto de las dos vías del tren, como de los anchos de los carriles mixtos (un mínimo posible de tres metros cada uno) considerando que no circula carga y se retirarían los buses, permitiendo así tres carriles hacia el sur y dos hacia el norte, observando en el modelo reducción de la congestión.

IV. CONCLUSIONES

El resultado logrado con ayuda de las herramientas computacionales, permitió cumplir el objetivo de la investigación, al mostrar como posible el funcionamiento del tren ligero en la condición limitante de falta de espacio, en aplicación al caso especial de la Carrera 7ª, esto en la condición de no alterar significativamente la geometría de la vía para no poner en riesgo el patrimonio arquitectónico valioso de esta vía. Esto se pudo mostrar en el *render* de la estación especial en el punto más angosto del sector estudiado.

Esto da confianza para subsiguientes investigaciones que permitan precisar capacidad de movilidad del sistema del tren ligero en las condiciones específicas aquí estudiadas, así como para los ajustes que se hagan necesarios.

El logro del propósito de este proyecto, en buena parte se debe a característica propia del tren ligero y su modo de operación (en línea), pues ocupa un ancho de vía mucho menor al requerido por otros sistemas. De acuerdo a las dimensiones resultantes mostradas en los planos que se elaboraron con los resultados (utilizando AutoCAD) [27], se muestra que para la estación, con líneas del tren en ambos sentidos y permitiendo hasta cinco carriles mixtos, según se explicó, se requerirían alrededor de 23 metros de anchura total de calzada, existentes en la mayor parte de la Carrera 7ª, a diferencia de los más de 30 metros que necesitaría un sistema tipo BRT como el TransMilenio (exigiendo sobrepaso en las estaciones).

Este estudio mostró afectación del flujo vehicular al reducir los carriles mixtos a cuatro en ambos sentidos (de los seis actuales) para que entre a operar el tren, principalmente en las intersecciones en el sector considerado, situación que, de acuerdo a la verificación hecha, podría mejorarse en varios puntos si se retirasen de la vía los buses que allí operan, a la vez que se hagan ajustes a un mínimo de la anchura de los carriles mixtos, según se pudo visualizar en el modelo. Sin embargo, de no parecer esto suficiente, se recomendó investigar más la situación, buscando aprovechamiento de la condición particular de la Carrera 7ª, que presenta hondonadas importantes en varias de las intersecciones que facilitarían construir pasos elevados para el tren con escasa pendiente (investigación que ya está realizando el grupo).

Dada la inevitable interacción del sistema del tren ligero (LRT) con el tráfico mixto y en intersecciones, es importante resaltar, que por su incidencia en la capacidad del sistema y la operación vehicular en la zona de influencia, como pudo observarse en esta modelación, amerita mayor estudio de la situación para establecer el grado de incidencia y, así, poder orientar las mejoras necesarias; situación que se hace válida para cualquiera de los sistemas de transporte masivo que se quieran implementar especialmente en condiciones limitantes.

Se destacan el poder y ventajas de la simulación computarizada para la construcción de modelos apropiados a ciertas condiciones, facilitando la investigación más donde se requiera analizar y desarrollar sistemas operativos, como en este caso, a la vez, permitiendo perfeccionar los diseños durante el proceso de modelación. Estas ventajas también indicaron que los procesos sistematizados aquí aplicados y sus resultados, aunque logrados en aplicación específica, pueden ser utilizados para otras vías en condiciones similares; aspecto de trascendencia por la situación nacional de exigencia de transporte público sostenible. Se ha ganado conocimiento importante sobre sistemas LRT, muy poco conocidos en Colombia, junto con la determinación de condiciones relacionadas con la sostenibilidad ambiental en la movilidad, en este caso en el corredor de la Carrera 7ª. Los sistemas eléctricos, como el LRT y otros, se sabe, garantizan baja

contaminación y uso en Colombia de fuentes renovables de energía, contribuyendo a la reducción de las emisiones que actualmente están poniendo en riesgo la salud de los habitantes urbanos. Se buscaría un sistema de transporte público que aporte a la calidad de vida, poco logrado en Bogotá ante un crecimiento acelerado.

En vista de que la simulación aquí desarrollada mostró alta sensibilidad de los resultados al tráfico y a la complejidad de la intersección y semaforización, se hizo válido profundizar este aspecto, tanto para calcular el nivel de sensibilidad de los resultados, como para profundizar más para continuar desarrollando propuestas adecuadas, incluso independiente del a implementar.

Otro logro muy importante ha sido el conocimiento y manejo de software especializado por parte de los estudiantes involucrados en la investigación formativa, con interpretación y análisis de modelos para proponer soluciones; esto gracias a su participación en el Semillero.

Este proyecto también ha sido de utilidad en la vinculación del Programa de Ingeniería Civil de esta Universidad a los grupos académicos, empresariales y gubernamentales involucrados en la temática, incluyendo expertos nacionales e internacionales, aumentando las oportunidades para aportes a la comunidad, cumpliendo las políticas de proyección social de esta Universidad.

AGRADECIMIENTOS

A las directivas de la Universidad la Gran Colombia y de su Facultad de Ingeniería, además de los aportes y gestión administrativa de la Coordinación de Investigaciones y de la Coordinación del Área de Vías y Transporte del Programa de Ingeniería Civil. También va gratitud a la Empresa Sistemas Andinos de Ingeniería y Planificación - SAIP S.A.S. Bogotá, Colombia, distribuidor oficial del software, por préstamo del mismo con fines exclusivamente académicos. También, se agradece el apoyo económico de la Fundación de Desarrollo de la Educación Superior (FODESEP), Ministerio de Educación Nacional.

REFERENCIAS

- [1] Steer Davis Gleave, *Revisión, actualización y calibración de modelo de transporte en cuatro etapas para Bogotá y la Región Capital*. Informe para el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). 2011. Disponible en: Centro de Información del IDU, Calle 20, No. 9-20. Bogotá, Colombia.
- [2] Alcaldía Mayor de Bogotá. *Proyecto Corredor Verde – Solución Urbana Integral Carrera 7ª. Bogotá Positiva 2008-2012*. Bogotá. 2011. En: www.transmilenio.gov.co.
- [3] TransMilenio, S.A., *Presentación Metro Ligero de Bogotá - versión 2*. Diapositivas (119). 2012. En: www.transmilenio.gov.co.
- [4] Alcaldía Mayor de Bogotá. *Bogotá Humana – Movilidad Humana. Plan de Desarrollo 2012-2016*. Acuerdo 489/2012 del Concejo de Bogotá. p. 195. En: <http://idrd.gov.co/sitio/idrd/Documentos/PLAN-DESARROLLO2012-2016.pdf>.
- [5] Cámara de Comercio de Bogotá y Universidad de los Andes, *Observatorio de Movilidad 2014*, No. 8. 2015. Bogotá., Colombia.

- [6] Secretaría Distrital de Movilidad, *Informe de Rendición de Cuentas - Programa Movilidad Humana 2014*. Bogotá, Colombia. 2015. En www.movilidadbogota.gov.co.
- [7] Consejo Nacional de Política Económica y Social- CONPES de movilidad integral para la Región Capital. Departamento Nacional de Planeación – DNP. Bogotá, Colombia. 2013. En: <https://www.dnp.gov.co>.
- [8] Cámara de Comercio de Bogotá y Universidad de los Andes, *Observatorio de Movilidad 2014*, No. 8. Bogotá. 2015. p. 41.
- [9] Cámara de Comercio de Bogotá y Universidad de los Andes. *Boletín Especial Carrera 7ª*; No. 4. 16 p. Bogotá, Colombia. 2010. (ISSN 2027-1026).
- [10] L. Lesley, *Light Rail Developers' Handbook*, Fort Lauderdale, Fla., USA: Ross Publishing Inc, 2011 (ISBN 978-1-60427-048-8)
- [11] Y.R. Vuchic, *Urban Transit Systems and Technology*, Hoboken, N.J., John Wiley Inc. 2007 (ISBN 978-0-471-75823-5).
- [12] World Health Organization (WHO). International Agency for Research on Cancer, Press Release No. 213, June 12, 2012. En: www.iarc.fr/en/media.centre/iarcnews/.
- [13] Alcaldía Mayor de Bogotá, *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá (PDDAB)*. Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, TransMilenio S.A. y Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 2010.
- [14] E. Velandia, *Energía eléctrica, Alternativa energética para un transporte urbano sustentable en Colombia*, CODENSA, S.A., Bogotá, Colombia. 192 p., 2009 (ISBN 978-958-44-6016-5)
- [15] H. Carvajal-Osorio, M.F. Valdés, “Sostenibilidad en transporte masivo en condiciones limitantes, con implementación de tren ligero (LRT)”. Actas del 3er Congreso Internacional de Movilidad Urbana Sostenible-EIMUS, noviembre 2013, Lima, Perú. ASIMUS, Barcelona, España, en prensa.
- [16] J.G. Corredor, J.A. Misat, *Estudio de condiciones técnicas de estación elevada del sistema de transporte masivo avanzado de tren ligero – Carrera 7ª entre Calles 39 y 53*. Director: H. Carvajal-Osorio. Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. 2013.
- [17] J.E. Gaitán, J. Niño, *Espacio público para el tren eléctrico ligero en la carrera 7ª, entre calles 32 y 53*. Director: H. Carvajal-Osorio. Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. 2013.
- [18] H. Carvajal-Osorio, Memorias III Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, noviembre 2015, en prensa.
- [19] Caliper Corporation, *TransModeler - Traffic Simulation Software - Catálogo*. Newton, Ma., USA. 2011. En: www.caliper.com.
- [20] HDRI – Tutorial. En: www.hdritutorial.com/hdritutorial/como-iluminar-con-hdri-en-lightware-y-maxell-render/.
- [21] Department Of Transport – DOT. *Traffic Analysis Toolbox Volumen III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software*. En: http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysis/tools/tat_vol3/. 2014.
- [22] Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, Bogotá - Contrato IDU133-2005: Estudios y diseños de la Troncal Calle 26. Consorcio General. Bogotá, Colombia. 2005. En: www.idu.gov.co/web/guest/pmb/.
- [23] H. Díaz, Y.F. Martínez, *Intersecciones tipo diamante divergente, análisis de implementación en ciudades colombianas*. Monografía. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2011.
- [24] Caliper Corp. Autodesk Knowledge Network. Tutoriales. En: <https://knowledge.autodesk.com/support/>. (s.f.)
- [25] Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. *Cartilla para el puente peatonal prototipo para Bogotá*. (s.f.). Bogotá, Colombia. En www.idu.gov.co/web/guest/tramites_doc_manuales.
- [26] Velasco, Edwin J.E. *Modelo sistematizado del flujo vehicular transversal oriente-occidente en la Carrera 7ª, entre calles 34 y 53, en incorporación de sistema de transporte tipo tren ligero (LRT)*. Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. 2014.
- [27] H. Carvajal-Osorio, Informe final del Proyecto BIM (Building Infrastructure Modeling). Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia. Bogotá. Colombia. 2015 (marzo). Sin publicar.

Modelación en Transporte Público con Tren Ligero LRT en la Carrera 7, Bogotá, Colombia

Hernán Carvajal-Osorio, Ph.D. ¹, Edwin J.E. Velasco, Ing. Civil ¹, Martín F. Valdés, Ing. Civil ¹

¹ Universidad La Gran Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá., Colombia, hernan.carvajal@ugc.edu.co, edwin.velasco@ugc.edu.co, martinfelipe77@hotmail.com

Resumen- Como aporte de posibles soluciones a los problemas de movilidad en la ciudad de Bogotá, Colombia, esta investigación aplicó herramientas computacionales de modelación a la supuesta operación de un sistema de transporte masivo tipo tren ligero (LRT) en la importante vía Carrera 7a, buscando mejorar el transporte público, adaptado a las características particulares limitantes de esta arteria vial. Por medio de software especializado, primero, se modeló el tráfico en el tramo de la Carrera 7ª entre Calles 34 a 53, incluidas las intersecciones principales para determinar posibles interferencias de la operación del LRT, empleando el programa TransModeler y, segundo, se completó diseño conceptual y simulación en render de estación especial con plataforma de espera elevada, en sitio escogido como el más angosto del sector estudiado. El problema principal de dicha avenida es el deficiente servicio de transporte público, con alto grado de congestión vehicular y contaminación, con falta de espacio e intentos fallidos de implementación del TransMilenio convencional, sistema tipo BRT. El resultado mostró como viable el funcionamiento del tren ligero en las condiciones limitantes de la Carrera 7ª, aunque con afectación del flujo vehicular principalmente en las intersecciones, pero en la condición de no afectación de predios con valioso patrimonio inmobiliario. Se demostró así la utilidad de la modelación sistematizada, y se hizo propuesta de continuar estudios de mejoramiento de las intersecciones para reducir interferencias del tren con el flujo vehicular normal.

Palabras Claves: Modelación de transporte público, modelación sistematizada, renderización, tren ligero.

Abstract- As a contribution to solve mobility problems in Bogota, Colombia, this research applied computerized modeling techniques to study how to improve public transportation by implementation of an intended LRT system along the important Carrera 7 avenue, in consideration of its particular limiting conditions. Using specialized software, firstly, TransModeler simulated traffic flow conditions in the Carrera 7 sector between 34th and 53rd streets, intersections included, to determine possible interferences of the light train operation; secondly, a particular train station concept, with elevated waiting platform, was conceptually designed and modelled in render format, adapted to the narrowest street section and minimum parallel traffic interferences. The Carrera 7's main problems are a deficient public transportation service, and high traffic congestion and contamination, in limited physical space conditions, with failure on implementing the conventional TransMilenio, a BRT system. The study results showed a possible light train operation even in limiting space conditions and no need of private property acquisitions containing highly valued buildings, but with traffic interferences at intersections. Computerized modeling usefulness was realized, with recommendation to continue studies to solve train interference to normal vehicle traffic at intersections.

Keywords: Public transportation modeling, computerized transport system simulation, render, light train.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación desarrolló, por medio de modelación sistematizada, el estudio de características y condiciones requeridas en la implementación de un sistema férreo de transporte masivo tipo tren ligero LRT (por sus siglas en inglés de: *Light Rail Transit*) en la ciudad de Bogotá, específicamente acondicionado a las condiciones especiales de la Carrera 7ª. Esta avenida fue seleccionada por su importancia como arteria vial de la Capital, con alto flujo de vehículos particulares, oficiales y de servicios, atendiendo a sectores comerciales, financieros, educativos, de salud y residenciales, como parte del denominado corredor oriental que recorre de sur a norte la Ciudad en toda su extensión con la máxima demanda de transporte público [1]. Sin embargo, presenta alta congestión y contaminación por las emisiones vehiculares, a la vez, con limitaciones espaciales que dificultan la implementación de un sistema de transporte público efectivo, tema central de este proyecto.

En vista de lo anterior, se identificaron ciertas particularidades de la Carrera 7ª, que este proyecto asumió como puntos clave para el desarrollo de varias ideas de solución, en especial para esta investigación, lo relacionado con la estrechez de la vía, con seria limitación para su ensanchamiento, como se explica más adelante. Ya la Alcaldía de Bogotá desde 2011 había propuesto convertir dicha avenida en un corredor verde [2], presentando como una de las alternativas la implementación del LRT, como elemento central de transporte masivo [3]. Adicionalmente, desde 2012 la Alcaldía propuso una red de cerca 80 km de trenes ligeros para la Ciudad, además de la primera línea del metro [4]; ésto en atención a planes nacionales y locales de reducción de emisiones, en revisión actual por parte de la reciente administración local en ejercicio (desde enero 2016).

La Carrera 7ª o Avenida Alberto Lleras Camargo, objeto de esta investigación, tiene un carácter emblemático para la Ciudad por su valor histórico y cultural, contando con edificaciones de alto valor tanto antiguas, como modernas de altura. La existencia de este patrimonio arquitectónico limita el ensanchamiento de calzadas (actualmente con seis carriles) y andenes, más para introducir vías expresas de transporte público, como se ha querido (ver Gráfica 1). Esto exige un

diseño acorde del sistema de transporte por esta avenida, como aquí se presenta en resultado de la investigación.



Gráfica 1. Vista panorámica (hacia el norte) de la Carrera 7ª – parte del tramo en estudio, mostrando intersecciones de Calles 37 y 38. Fuente: Google Earth

Este artículo presenta la metodología aplicada con base en modelación sistematizada realizada con *software* especializado, tanto para el análisis de tráfico en interacción con la infraestructura del tren ligero previsto, como para el diseño conceptual de una estación de abordaje especial que garantice el acceso en un sitio angosto de la vía. El estudio se limitó al sector de la Carrera 7ª entre Calles 34 y 53, uno de los más críticos por falta de espacio y alta demanda de pasajeros de transporte público.

La investigación fue motivada por la urgente necesidad de propuestas válidas de solución a la deteriorada de movilidad de Bogotá, que se complica cada vez más por una población urbana creciente ya cercana a los ocho millones de habitantes, que demanda transporte masivo para atender más de doce millones de viajes diarios, de los cuales el 41 % se hace en transporte público colectivo. La movilización en vehículos privados está por debajo del 15% [5], [6], con un índice de motorización bastante bajo todavía, ya que el 70% de los hogares colombianos no poseen vehículo [7].

Sin embargo, a pesar de los numerosos estudios y discusiones sobre la movilidad en la Carrera 7a, no se han dado todavía soluciones satisfactorias, mientras crecen población, número de vehículos en circulación, índices de

accidentalidad y contaminación, en medio de la congestión y poco orden en el tráfico, con falta de vías adecuadas. La introducción en Bogotá, desde el año 2000, del TransMilenio (TM), sistema tipo BRT (por sus siglas en inglés de: *Bus Rapid Transit*), si bien ha significado una mejora importante del transporte público de la Ciudad, en atención actualmente del 43 % de la demanda de transporte público [8], ya muestra saturación y muy alta congestión por su insuficiencia. Recientemente se viene consolidando el sistema integrado de transporte público – SITP, con buses en vías mixtas, al tiempo que se implementan algunas rutas del TM en la Carrera 7ª, con carriles exclusivos y servicio de buses articulados e híbridos.

El problema de la Carrera 7ª de limitación de espacio físico, se hizo evidente cuando se quiso implementar en esta vía el sistema TM tradicional, con carriles expresos segregados para los buses y con sobrepaso en estaciones, lo cual obligaría ejecutar obras costosas y ampliación de la vía en varios puntos [9], contrariado la conservación del patrimonio arquitectónico de esta avenida, además de los altos costos de los predios. La Alcaldía de ese entonces (en 2010), buscando reducir costos y estimando una menor demanda al considerar una próxima entrada en funcionamiento del metro (todavía lejana), intentó implementar lo que se denominó “Transmilenio ligero”, el cual en varios trayectos tendría paraderos en los costados de la vía sobre las aceras y sin sobrepaso en las estaciones, con restricción importante del tráfico mixto; sistema que no tuvo buena aceptación y, finalmente, el contrato de construcción fue suspendido en sus inicios.

La opción del tren ligero tipo LRT, que por características propias requiere menor anchura de vía (al transitar guiado sobre rieles), permite aprovechar esta condición para obviar en parte las limitaciones espaciales, además de sus otras ventajas en el campo energético y ambiental [10], [11], aspectos centrales de este proyecto. Esto también atiende uno de los problemas serios en la Capital, y específicamente en la Carrera 7ª, cual es la alta contaminación producida casi exclusivamente por las fuentes móviles que queman combustibles fósiles, siendo esto de grave preocupación por sus efectos nocivos en salud. El material particulado emitido por los buses operando con diésel, uno de los contaminantes más peligrosos por su incidencia en afecciones pulmonares graves [12], presenta en varios sitios índices de concentración que sobrepasan los límites permisibles [5], [13]. Al implementarse sistemas eléctricos, como el tren ligero, de casi nula contaminación en el sitio de operación, contribuirían a mejoras sustanciales del ambiente, satisfaciendo así uno de los requisitos más importantes de la sostenibilidad [14], [15]. Actualmente, Medellín es la única ciudad en Colombia que cuenta con dicha tecnología, con un metro y el primer tren ligero, a la par de numerosas ciudades del exterior. Bogotá contó con tranvías a principios del siglo pasado.

El objetivo de la investigación fue determinar la viabilidad de operación del tren ligero en interacción con el flujo vehicular en la zona en consideración sobre la Carrera 7ª, por medio de modelación computarizada tanto del tráfico, como

para diseñar la estación especial con acceso elevado al LRT, ideada para espacios reducidos, a la vez, simulando su operación en un *render*.

El proyecto no comprendió aspectos económicos, ni reglamentarios. La investigación hace parte de los estudios de movilidad urbana sostenible que adelanta la Facultad de Ingeniería de la Universidad La Gran Colombia, Bogotá, con participación de estudiantes de ingeniería civil en el Semillero de investigación VITRA.

Previamente, en otras investigaciones dirigidas por uno de los autores, con aportes de proyectos de grado de estudiantes del Semillero [16], [17], primero, se estudiaron las características viales y geométricas del sector de la Carrera 7ª que, verificados flujos peatonales y vehiculares, permitieron establecer las condiciones del espacio público e identificar los sitios críticos de la vía en cuanto espacio, determinando localizaciones de posibles estaciones del LRT en el sector en estudio. Segundo, identificadas las características técnicas de los sistemas LRT, se desarrolló una primera modelación de diseño esquemático [12] de la estación especial para acceso elevado al LRT, que luego se perfeccionó en este proyecto, asegurando reducida interferencia con el tráfico mixto y localizada en el punto más crítico de la Carrera 7ª en cuanto a espacio disponible.

La Alcaldía de Bogotá, en administración anterior, también consideró, bajo la figura de asociaciones público privadas (APPs) y conjuntamente con el Departamento de Cundinamarca [6], la implementación de dos líneas de tren de cercanías tipo LRT, una hacia al Municipio vecino de Facatativá, al occidente, con servicio también a las poblaciones de Mosquera y Madrid; la segunda línea hasta el Municipio de Soacha (al suroccidente), con alta demanda de transporte hacia el centro y norte de Bogotá.

Los resultados de la investigación que aquí se presentan, pueden ser aplicables, según condiciones en cada caso, a otras rutas posibles del tren ligero en Bogotá o en diferentes ciudades.

II. METODOLOGÍA

Los desarrollos avanzados de los sistemas computacionales (*hardware* y *software*) facilitan considerablemente los procesos de diseños estructurales y de operación de sistemas complejos, con capacidad de simulación que permiten visualizar y validar lo diseñado sobre modelos con representaciones gráficas estáticas y dinámicas con apariencia casi real. La mayor ganancia está en que estos modelos pueden ser manipulados fácilmente para los diferentes análisis del sistema y su comportamiento, facilitando los ajustes y mejoras durante el proceso de desarrollo con solo cambiar ciertos parámetros en el computador.

Esto se ha aprovechado en este proyecto para estudios relacionados con la movilidad en Bogotá, en este caso en aplicación sobre la Carrera 7ª, en consideración a una posible solución de transporte público basado en la posible

implementación del tren ligero, buscando mayor sostenibilidad y mejor calidad de vida [18]. La zona donde se aplicó este trabajo es mostrada en parte en la Gráfica 1. Se pueden observar allí las intersecciones con Calles 37 38 y 39, el Parque Nacional y la Universidad Javeriana (al fondo, lado derecho), así como edificaciones antiguas y modernas a ambos costados, siendo el sitio donde estaría la estación especial frente a la Universidad Javeriana. Puede apreciarse también el importante volumen de tráfico de vehículos de varios tipos.

La investigación se valió de la tecnología informática, aplicando software especializado tanto para micro-simulación de flujos de tráfico, como de modelación con simulación en *render* de la estación especial para acceso elevado al tren ligero en aplicación a las condiciones, a manera de ejemplo, de la Carrera 7ª de Bogotá. El proceso sistematizado facilitó el diseño y permitió ajustes para lograr el propósito de un acceso adecuado al sistema LRT en un sitio crítico de espacio limitado y reduciendo afectación del tráfico vehicular mixto. Esto comprendió dos procesos de modelación diferentes pero complementarios, como se detalla a continuación.

A. *Micro-simulación de tráfico en incorporación del tren ligero por la Carrera 7ª*

Con el propósito de determinar las condiciones del tráfico vehicular en sus diversas modalidades en el trayecto escogido de la Carrera 7ª de Bogotá, sector entre Calles 34 y 53, se realizó la micro-simulación del tráfico tanto de las intersecciones con Calle 39 y Calles 45-46, por ser las principales en el sector considerado, así como del flujo vehicular mixto en sectores contiguos.

Para dicho fin se escogió el *software* TransModeler [19], dada su versatilidad y amplia capacidad, como mejor lo relaciona su fabricante Caliper Corp. [19]: “...Es un potente y versátil paquete de simulación, aplicable a una amplia gama de tareas de planeamiento y modelación de tráfico. TransModeler puede simular toda clase de redes de viales, desde autopistas hasta calles de los centros de las ciudades, y puede analizar redes multimodales de áreas extensas, con gran detalle y fidelidad.”. De esta manera se facilitó analizar la situación al integrar el modelo del tren ligero operando en dicha arteria vial, junto con la simulación de los flujos vehiculares.

La micro-simulación consiste en superponer varias capas de componentes del sistema, la primera, representando en un gráfico de nodos sus interrelaciones que sirven de base al modelo; luego se superponen los datos de control de tráfico y operaciones de las relaciones, para agregar otra capa con la demanda de viajes y comportamiento de los viajeros, agregándose finalmente los controles de la operación del modelo. Se agrega el control de aseguramiento de la calidad para reducir posibles errores en la codificación de los datos de entrada. Las variables y parámetros principales comprenden [20], [21]:

- Geometría de las vías con sus intersecciones: distancias, carriles, curvaturas, separadores, etc.
- Controles al tráfico: señales y sus tiempos.
- Demandas de: volúmenes vehiculares que se incorporan a las vías, volúmenes en los cruces, con aplicación de tablas origen-destino (O-D).
- Datos de calibración: conteos de tráfico y desempeños, velocidades.
- Datos sobre tipo de vehículos y comportamiento: aceleraciones, desempeño del conductor (dados por defecto por el programa si no han sido determinados).
- Parámetros de control que especifican cómo el modelo ejecutará la simulación de acuerdo al caso específico: tiempos de simulación, selección de datos de salida y la resolución deseada de los resultados.

Lo anterior exige tener disponible la información requerida, lo cual necesitó realizar mediciones de conteos de tráfico y de saturación del flujo vehicular, lo cual se verificó en trabajo de campo de los estudiantes del Semillero; también, para la determinación del desempeño del sistema, esto es, tiempos de viaje, velocidades, retrasos y longitudes de colas. La inspección visual del sitio en estudio es fundamental para reconocer características de la vía y las intersecciones, útil también para descubrir errores en la verificación del modelo. También debe tenerse en cuenta el comportamiento del conductor (esto es, distancia entre vehículos, espacio para cambios de carril, tiempos de respuesta y accionar ante la señal amarilla), pues son condiciones que determinan en gran parte el desplazamiento vehicular. Algunos de estos parámetros se tomaron del programa dados por defecto.

Para aplicar este método con el desarrollo del modelo, antes se conocieron aplicaciones en estudios ya realizados para el Instituto de Desarrollo Urbano - IDU de Bogotá, en diseño de intersecciones de la Avenida Calle 26, (en Fase IV del TransMilenio) [22], y por la Alcaldía de Medellín (en implementación de la primera línea de tren ligero del país), así como uso del TransModeler en Bucaramanga [23], para diseño de una intersección tipo diamante de dos importantes arterias de esa ciudad.

B. Simulación con el Programa TransModeler

En mayor detalle, el *software* TransModeler utiliza técnicas sistematizadas para simulación de sistemas viales en áreas geográficas que se definen gracias a su enlace con sistemas de información geográfica (SIG). La simulación puede ser conjunta o separada en los niveles micro-, meso- y macroscópica [19]. En la primera, el programa simula el comportamiento de cada vehículo, incluyendo aceleración y desaceleración, intervalo entre vehículos, cambios de carril y confluencias de flujos vehiculares, dependiendo de la geometría de la vía. El programa puede hacer asignación dinámica de tráfico según tablas O-D, desarrollando datos sobre tiempos de viajes, así como las trayectorias de los vehículos en seguimiento a información externa o ejecutando asignaciones. En la simulación mesoscópica, los vehículos

pueden agruparse por celdas y corrientes de tráfico, basándose en capacidades de la vía y funciones de velocidad-densidad predefinidas. Con el simulador a nivel macroscópico de redes viales urbanas, se modela en base a demoras y volúmenes de tráfico según la clasificación de las vías, opción esta última no utilizada en esta ocasión.

El programa, al examinar las restricciones de capacidad y el efecto de las colas, puede incorporar estrategias de derecho preferente para el transporte público, opción que aquí se empleó para operación del tren ligero, además del comando de los semáforos dentro de ciertos límites, para así analizar interferencias de tráfico y sus demoras.

Las simulaciones con TransModeler comprendieron: demoras por vehículo, paradas, colas, velocidades promedio y niveles de servicio que se presentan en cada uno de los tramos de vía en consideración y las que confluyen en las intersecciones, como el caso en estudio de la Carrera 7a. Estos resultados fueron aprovechados para proponer optimización de la operación semafórica de acuerdo a las condiciones de la vía y la demanda, tanto antes como después de la entrada en operación del tren ligero.

Dicho potencial de simulación permitió la determinación y análisis del comportamiento del tren en coexistencia con el flujo mixto y de las posibles interferencias mutuas del tránsito transversal a la línea férrea en las intersecciones, dando como resultado el posible efecto sobre el tráfico vehicular y sobre la operación del tren mismo al suponer su implementación en la Carrera 7a.

C. Modelación (con renderización) de la estación especial de acceso elevado al sistema LRT.

La modelación gráfica en 3D aplicada en este caso fue con el desarrollo del denominado *render* (término en inglés), con lo cual se generan imágenes tanto estáticas como en animación, con el grado de sofisticación deseado. Se basa inicialmente en cálculos de iluminación y texturizado según los materiales empleados, aplicados a una matriz que contiene toda la información geométrica del dispositivo o sistema en modelación y de los alrededores [20]. Partiendo de bocetos muy básicos (figuras simples en 3D, como cubos, esferas y otras superficies en perspectiva) y un esquema del sistema a trabajar que se suministra al programa, el proceso de renderización genera modelos detallados del diseño y su funcionamiento que dan la sensación de realismo de acuerdo al grado de complejidad deseado. En este caso, este proceso se empleó para concretar el diseño conceptual y simulación de la operación parcial de la estación especial concebida para el sitio más limitado en espacio de la Carrera 7ª (que se identificó entre Calles 40 y 43 [17]).

La Fig.1 muestra en detalle la secuencia del *software* especializado utilizado para el diseño y obtención del *render*,



Figura 1. Etapas con el *software* utilizado para la modelación en *render* de la estación especial de abordaje del tren ligero, con plataforma de espera elevada. Fuente: elaboración propia.

simulando la estación, su función y el entorno. Se inicia con determinación de localización con ayuda de herramientas Google y la introducción del esquema básico. Luego entran los programas de Autodesk [24] para crear y preparar la escena con una geometría muy básica, a la vez indicando materiales (metal, papel, plástico, cristal, etc.), así como las texturas deseadas, entre otros parámetros; se agrega iluminación de varias intensidades (en inglés: *radiance*) para aplicar por capas y así iniciar el proceso de renderización, habiendo tenido en cuenta las texturas según materiales y acabados; ésto dispuesto en secuencia de una serie de poligonales que tienen los datos correspondientes que entran a formar cada imagen; esta es colocada sobre una cara o serie de caras del objeto para darle forma. Se termina con los ajustes necesarios en reflejos, profundidad de campo y el nivel del muestreo (número de iteraciones para el cálculo de la luz).

Se realiza con AutoCAD el diseño arquitectónico que se introduce al programa principal Autodesk 3dsMax [24], el cual inicialmente desarrolla el modelo esquemático para adaptar los diferentes componentes del diseño. Finalmente, el programa Plug-in Populate modela personas y vehículos incluido el tren, de manera que al hacer una secuencia rápida de numerosas imágenes, produce la sensación de movimiento. La visualización final del modelo en 3D se logra con la ayuda del programa Adobe Premier, facilitando su edición para mostrarse en YouTube y en medio óptico (DVD) de respaldo.

La utilización de este software especializado para lograr el render, por no contar con él en el grupo de investigación, ni la experiencia, se realizó en contratación externa de especialista con las licencias respectivas. El trabajo se basó en los cálculos y detalles suministrados por dos de los autores. Un bosquejo inicial había sido preparado en el Semillero como proyecto de grado bajo la dirección de uno de los autores [16].

El diseño se realizó de acuerdo a normativa local sobre espacio público establecida por la Alcaldía Mayor de Bogotá-IDU [25]. Se utilizaron dimensiones y características de las escaleras eléctricas fueron seleccionadas, a manera de ejemplo, de especificaciones técnicas de fabricante conocido.

III. RESULTADOS

A continuación se detallan los resultados que se lograron, habiendo iniciado el trabajo con el conocimiento del *software* utilizado y sus capacidades, la recopilación y acondicionamiento de la información pertinente, para una vez procesada y analizada en su aplicabilidad, entrar a desarrollar los modelos utilizando el *software* especializado descrito. El procesamiento computacional permitió hacer visible y cualificar tanto el comportamiento simulado de tráfico en el sitio de interés, como el modelo de estación especial y su funcionamiento en el momento de arribo del tren y el abordaje de los pasajeros.

La Gráfica 1 (mostrada arriba) da una vista panorámica de parte del sector de la Carrera 7ª donde se centró el trabajo.

A continuación se explican por separado los resultados de ambas modelaciones, del tráfico y de la estación.

A. Caracterización y modelación de intersecciones

Verificados en trabajo de campo los flujos vehiculares en los puntos de interés, esto es, intersecciones de la Carrera 7ª con Calle 39 y 45-47 (Tabla I), y contando con el diseño geométrico de la vía e intersecciones tomadas de estudios hechos por la Alcaldía de Bogotá [2], se produjo la red de circulación simulada convertida en una capa geográfica de

líneas, con la base de datos de la red de tráfico en el sector considerado.

Con el programa TransCad [24], actuando como estimador de las tablas de viajes, se fijaron los valores de conteos de tráfico que se muestran en la Tabla I, tomados de 6 a 9 de la mañana de un día típico. Los datos se organizaron por los movimientos (giros y cruces de tráfico) señalados con números que corresponden a los indicados sobre las flechas de las Figs. 2(a) y 2(b), que representan ambas intersecciones en estudio. La clave de esta numeración aparece detallada en el cuadro incluido en la misma Fig. 2, para identificar los movimientos correspondientes.

Así se generaron en el *software* TransModeler los códigos de entrada al programa con los conteos respectivos, formando las matrices de viajes sobre demanda en la red en consideración, para uno de los casos mostrada en la Fig. 3. Esto también podría servir, en caso de ser requerido, para establecer un plan de transporte integrado al tren ligero.

TABLA I. CONTEO DE VEHÍCULOS EN INTERSECCIONES DE LA CARRERA 7ª CON CALLE 39 Y CALLES 45 Y 47, [26]

HORA Y DÍA: 6:00am - 9:00am	Mar. 8/13 (vie.)	Acceso
LOCALIZACION	MOVIMIENTO	OESTE
CARRERA 7 X CALLE 39	7	3635
	9(3)	1781
Total		5416
CARRERA 7 X CALLE 45 Y 46	3	2130
	7	3348
	9(3)	832
Total		6310
CARRERA 7 X CALLE 53	3	9049
	7	3156
	9(3)	1509
Total		13714
Total general		25440

^aLa clave para los números dados para cada movimiento, puede verse en la Fig. 2

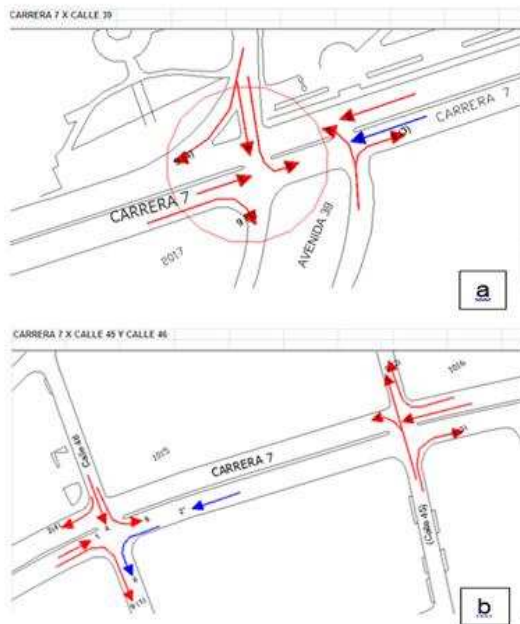
Los modelos creados contienen los tipos y características de los vehículos que fueron identificados en circulación en la Carrera 7ª, superpuestos con las características de las intersecciones y la semaforización con asignación de tiempos.

La simulación así producida por TransModeler muestra los flujos vehiculares con diferenciación de los carros con colores codificados según las velocidades de desplazamiento. Así se pudo analizar en el modelo final de las intersecciones en capacidad, demanda y niveles de servicio de cada una, con los varios cruces vehiculares que allí se da.

El resultado del estudio de la intersección de la Calle 39, la más compleja del sector de la Carrera 7ª en consideración (Fig. 2a), muestra la situación complicada que se genera principalmente por la operación no bien controlada entre los varios semáforos para los varios cruces que allí existen. Un cruce específico, por ejemplo, el giro a la izquierda desde el occidente para tomar la Carrera 7ª hacia el norte, que cuenta con muy poco espacio para la cola de espera al dar vía, se mostró complicando la totalidad de la intersección al obstaculizar los otros movimientos, con tiempos de semaforización inadecuados; lo cual exige su revisión y ajuste acorde con la demanda; más todavía para cuando se introduzca el tren ligero.

Otra de las simulaciones realizadas fue la del tráfico a lo largo de un tramo entre Calles 36 y 39 en el sector en estudio de la Carrera 7a, con una parte del resultado dado por TransModeler mostrando en la Fig. 4 vehículos transitando, con sus características y tasas de entrada y salida de la vía.

La Fig. 4 presenta una secuencia en cuatro cuadros de sendos momentos, con período de 15 minutos, con los vehículos desplazándose en hora de alto tráfico, diferenciando los niveles de congestión y las varias velocidades identificadas por colores (según clave incluida en cada cuadro). En esta secuencia, se pueden apreciar los efectos de un cerramiento parcial simulado sobre la vía sentido sur-norte, donde la simulación muestra la formación de las colas y cómo al final comienza a fluir el tráfico al retirarse el obstáculo, (último cuadro de Fig. 4).



CLAVE		
Acceso	Movimiento	Código
Norte	Directo	1
	Giro a izquierda	5
	Giro a derecha	9(1)
	Giro en U	10(1)
Sur	Directo	2
	Giro a izquierda	6
	Giro a derecha	9(2)
	Giro en U	10(2)
Oeste	Directo	3
	Giro a izquierda	7
	Giro a derecha	9(3)
	Giro en U	10(3)
Este	Directo	4
	Giro a izquierda	8
	Giro a derecha	9(4)
	Giro en U	10(4)

Figura 2. Identificación de flujos vehiculares en las intersecciones de la Carrera 7ª, Calle 39 (a) y Calles 45 y 46 (b).
(Las flechas más oscuras indican contraflujo de la Carrera 7ª durante ciertas horas, ya no existente)

Phase	1	2	3	4	5
Coordinated	No	No	No	No	No
Recall Mode	Min	None	None	None	None
Min Green	20	7	7	7	7
Added Initial / Actuation	0	0	0	0	0
Max Initial					
Extension	2	2,4	2	3	3
Min Gap					
Max Green	32,9	32,9	22,9	37,9	37,9
Max Inhibit					
Yellow	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Red Clearance	3,5	3,5	3,5	3,5	2
Ped Call/Inhibit	0	0	0	0	0
Ped Time					
Memory Mode	L	L	L	L	L
Detectors	1,2,3,4,...	12,13,1...	5,5	6,9,10,...	6,7,6,7
LEINGTON RD	GGG	RRr	RRr	RRr	RRr
GREENSTEAD RD	RRr	GGG	GGr	GGr	GGG
LEINGTON RD	RRr	GGG	RRr	RRr	RRr
GREENSTEAD RD	RRr	RRr	RRr	RRr	RRr

Figura 3. Matriz (parte) dada por TransModeler en pantalla del PC, con características de vehículos y tasas de entrada/salida, en las intersecciones con Calle 39 y Calles 45-47, incluido el tren ligero. Fuente: Los autores



Figura 4. Flujo vehicular con convergencia de distintas clases de tráfico (secuencia de cada 15 minutos), con efecto de cerramiento parcial con identificación de velocidades (por colores). Fuente: Elaboración propia, desarrollo con TransModeler

Para el estudio con tren incorporado en el modelo, primero se simuló la vía antes de introducir el tren, con el flujo de carros particulares y de buses de transporte público recorriendo la Carrera 7ª, mostrando fluidez normal con tres y cuatro carriles libres para tráfico mixto, como se indica en la Fig. 5.



Figura 5. Simulación de TransModeler de flujo de vehículos en arteria vial, con dos carriles centrales para posible uso por el tren ligero. Fuente: TransModeler

El área que sería ocupada por los rieles del tren (éste todavía no incluido) está representada por dos franjas centrales gruesas, separadas por línea continua de los carriles mixtos (identificadas con la leyenda en inglés: *Lane closed for median work*). En este caso, se aprecia tránsito normal y rápido.

Sin embargo, con dos carriles en cada sentido en vías estrechas, el modelo mostró congestión en hora pico. En el caso de la Carrera 7ª, actualmente con seis carriles, la introducción del tren ligero, si dejara solo dos carriles por

sentido para tráfico mixto, como muestra la Fig. 6 (aparece sólo un tren en sentido hacia el norte), se produciría, según el modelo, fuerte congestión en el sentido hacia el sur en hora pico. Esta situación sirvió para proponer dejar un carril adicional hacia el sur, como se explica más adelante en el análisis de la estación especial, por estar ésta en el punto más crítico en cuanto a espacio disponible.



Figura 6. Simulación resultante al introducir el tren ligero, conjuntamente con flujo vehicular mixto en los dos sentidos, sobre sector de la Carrera 7ª. Fuente: elaboración propia [26]

En el estudio del modelo de las intersecciones, la situación resultante de la interacción con el flujo vehicular, condujo a proponer [27], como primera medida, un replanteamiento de la semaforización, incluyendo su control; más con la posibilidad de establecer el comando de semáforos desde el tren, para dar prioridad de paso, con la ventaja adicional de conseguir operación óptima al hacerse automatizada. También se derivó, para ejecución en investigación posterior, el estudio de pasos elevados del tren sobre varias intersecciones, aprovechando aquellas que presentan perfiles topográficos con hondonadas pronunciadas que facilitarían el sobrepaso del tren con escasa pendiente.

B. Modelación en render de estación especial de acceso elevado

Se planteó como un desafío el desarrollo del diseño a nivel conceptual de la estación especial aplicando la modelación gráfica computarizada, generando una representación gráfica en render. De esta forma se hizo visible la operación simulada del tren y de la estación durante el arribo a la estación, su parada y recogida organizada de pasajeros y salida; además, sin afectación grande del tráfico mixto (sin buses ni carga), en circulación en carriles paralelos a las dos vías férreas centrales. También se simuló el movimiento de los pasajeros bajando ordenadamente en escaleras eléctricas sincronizadas con la operación del tren, desde la plataforma de espera en segundo piso, con verificación de tiempos de los movimientos; todo lo cual se puede apreciar en el *render* realizado, disponible en la Web, en: <https://www.youtube.com/watch?v=TlyFOozriCc&feature=youtu.be>.

Se estableció en el modelo un flujo de pasajeros sin dificultad para entrar y salir del tren a través de puertas distintas y utilizando escaleras diferenciadas, además, con tres ascensores para discapacitados, así, evitando aglomeraciones. Se contaría con un total de ocho escaleras, cuatro para cada sentido de viaje, un par para subir y otro para bajar, simultáneamente. El acceso peatonal desde la calle se haría por rampas elevadas sobre la acera a los costados de la avenida. De esta forma, quedó en evidencia (virtual) la funcionalidad y pertinencia del diseño de la estación, con suficiencia de servicio a pesar de lo limitado del espacio.

Gracias a la facilidad de contar con las herramientas de sistematización, se logró el doble propósito con el modelo de la estación especial: primero, contar con una representación simulada muy gráfica en 3D de la estación especial de acceso elevado, con apreciación de los volúmenes y perspectivas del sistema en su entorno, así como mostrando el flujo peatonal, y el vehicular mixto; segundo, permitir, a través del estudio detallado del modelo, complementación y mejoramiento del diseño preliminar, con manejo adecuado de los usuarios, en simultaneidad con la operación del tren en su parada y partida de la estación. Se pudo hacer afinación del diseño, mas no de detalle en estructuras y arquitectura de la estación. Esto abre el camino para investigación posterior, que permita verificar los tiempos de parada del tren y, así, con ensayos de frecuencias

del servicio de acuerdo a la demanda, se establecería más precisamente la capacidad de movilización del sistema de transporte y, por tanto, el flujo de pasajeros a manejar por la estación.

C. Otros resultados del análisis de los modelos con operación del tren ligero

Se evidenció también en el estudio de la intersección con las Calles 45-47 (Fig. 2b), la situación particular del tránsito en parte importante del corredor oriental (que comprende otras carreras paralelas a la Carrera 7ª hasta la Carrera 17), además con acceso a la Avenida Circunvalar (al extremo oriental). Dada la importancia de la zona, con un flujo vehicular bastante alto que se observa en la realidad y se aprecia en el modelo, se genera alta congestión del corredor oriental superando la capacidad de las vías y de la intersección de la Calle 45 con la Carrera 7ª; situación que se agravaría con la operación del tren ligero. Así, el modelo indicó la necesidad primaria de sincronizar semáforos, posiblemente comenzando desde la Carrera 30 (Avenida NQS, hacia el occidente) que se comunica con la Carrera 7ª a lo largo de toda la Calle 45; preferiblemente agregando a ésta al menos un-dos carriles. Afortunadamente, esta ampliación de la Calle 45, desde la Carrera 13 hasta la 7ª, acaba de realizarse, lo cual beneficiaría el proyecto del tren ligero o cualquier otro medio.

El otro aspecto interesante, resultado del análisis conjunto de ambos modelos del tráfico vehicular y de la estación especial, en relación con interferencias entre el tren y el flujo mixto en el sitio de la estación especial, al comparar en la simulación de TransModeler el antes y el después de implementar el tren ligero, se evidenció importante congestión en el sector estudiado de la Carrera 7ª, principalmente hacia el sur (Fig. 6), por reducción de los carriles de los seis actuales a cuatro (total en ambos sentidos) (Fig. 6). En vista de la situación, se decidió plantear otra opción en el número de carriles mixtos en el sitio de la estación, si se quiere evitar hacer ensanchamiento de la Carrera 7ª. Así, ajustando al mínimo de anchura, tanto de las dos vías del tren, como de los anchos de los carriles mixtos (un mínimo posible de tres metros cada uno) considerando que no circula carga y se retirarían los buses, permitiendo así tres carriles hacia el sur y dos hacia el norte, observando en el modelo reducción de la congestión.

IV. CONCLUSIONES

El resultado logrado con ayuda de las herramientas computacionales, permitió cumplir el objetivo de la investigación, al mostrar como posible el funcionamiento del tren ligero en la condición limitante de falta de espacio, en aplicación al caso especial de la Carrera 7ª, esto en la condición de no alterar significativamente la geometría de la vía para no poner en riesgo el patrimonio arquitectónico valioso de esta vía. Esto se pudo mostrar en el *render* de la estación especial en el punto más angosto del sector estudiado.

Esto da confianza para subsiguientes investigaciones que permitan precisar capacidad de movilidad del sistema del tren ligero en las condiciones específicas aquí estudiadas, así como para los ajustes que se hagan necesarios.

El logro del propósito de este proyecto, en buena parte se debe a característica propia del tren ligero y su modo de operación (en línea), pues ocupa un ancho de vía mucho menor al requerido por otros sistemas. De acuerdo a las dimensiones resultantes mostradas en los planos que se elaboraron con los resultados (utilizando AutoCAD) [27], se muestra que para la estación, con líneas del tren en ambos sentidos y permitiendo hasta cinco carriles mixtos, según se explicó, se requerirían alrededor de 23 metros de anchura total de calzada, existentes en la mayor parte de la Carrera 7ª, a diferencia de los más de 30 metros que necesitaría un sistema tipo BRT como el TransMilenio (exigiendo sobrepaso en las estaciones).

Este estudio mostró afectación del flujo vehicular al reducir los carriles mixtos a cuatro en ambos sentidos (de los seis actuales) para que entre a operar el tren, principalmente en las intersecciones en el sector considerado, situación que, de acuerdo a la verificación hecha, podría mejorarse en varios puntos si se retirasen de la vía los buses que allí operan, a la vez que se hagan ajustes a un mínimo de la anchura de los carriles mixtos, según se pudo visualizar en el modelo. Sin embargo, de no parecer esto suficiente, se recomendó investigar más la situación, buscando aprovechamiento de la condición particular de la Carrera 7ª, que presenta hondonadas importantes en varias de las intersecciones que facilitarían construir pasos elevados para el tren con escasa pendiente (investigación que ya está realizando el grupo).

Dada la inevitable interacción del sistema del tren ligero (LRT) con el tráfico mixto y en intersecciones, es importante resaltar, que por su incidencia en la capacidad del sistema y la operación vehicular en la zona de influencia, como pudo observarse en esta modelación, amerita mayor estudio de la situación para establecer el grado de incidencia y, así, poder orientar las mejoras necesarias; situación que se hace válida para cualquiera de los sistemas de transporte masivo que se quieran implementar especialmente en condiciones limitantes.

Se destacan el poder y ventajas de la simulación computarizada para la construcción de modelos apropiados a ciertas condiciones, facilitando la investigación más donde se requiera analizar y desarrollar sistemas operativos, como en este caso, a la vez, permitiendo perfeccionar los diseños durante el proceso de modelación. Estas ventajas también indicaron que los procesos sistematizados aquí aplicados y sus resultados, aunque logrados en aplicación específica, pueden ser utilizados para otras vías en condiciones similares; aspecto de trascendencia por la situación nacional de exigencia de transporte público sostenible. Se ha ganado conocimiento importante sobre sistemas LRT, muy poco conocidos en Colombia, junto con la determinación de condiciones relacionadas con la sostenibilidad ambiental en la movilidad, en este caso en el corredor de la Carrera 7ª. Los sistemas eléctricos, como el LRT y otros, se sabe, garantizan baja

contaminación y uso en Colombia de fuentes renovables de energía, contribuyendo a la reducción de las emisiones que actualmente están poniendo en riesgo la salud de los habitantes urbanos. Se buscaría un sistema de transporte público que aporte a la calidad de vida, poco logrado en Bogotá ante un crecimiento acelerado.

En vista de que la simulación aquí desarrollada mostró alta sensibilidad de los resultados al tráfico y a la complejidad de la intersección y semaforización, se hizo válido profundizar este aspecto, tanto para calcular el nivel de sensibilidad de los resultados, como para profundizar más para continuar desarrollando propuestas adecuadas, incluso independiente del a implementar.

Otro logro muy importante ha sido el conocimiento y manejo de software especializado por parte de los estudiantes involucrados en la investigación formativa, con interpretación y análisis de modelos para proponer soluciones; esto gracias a su participación en el Semillero.

Este proyecto también ha sido de utilidad en la vinculación del Programa de Ingeniería Civil de esta Universidad a los grupos académicos, empresariales y gubernamentales involucrados en la temática, incluyendo expertos nacionales e internacionales, aumentando las oportunidades para aportes a la comunidad, cumpliendo las políticas de proyección social de esta Universidad.

AGRADECIMIENTOS

A las directivas de la Universidad la Gran Colombia y de su Facultad de Ingeniería, además de los aportes y gestión administrativa de la Coordinación de Investigaciones y de la Coordinación del Área de Vías y Transporte del Programa de Ingeniería Civil. También va gratitud a la Empresa Sistemas Andinos de Ingeniería y Planificación - SAIP S.A.S. Bogotá, Colombia, distribuidor oficial del software, por préstamo del mismo con fines exclusivamente académicos. También, se agradece el apoyo económico de la Fundación de Desarrollo de la Educación Superior (FODESEP), Ministerio de Educación Nacional.

REFERENCIAS

- [1] Steer Davis Gleave, *Revisión, actualización y calibración de modelo de transporte en cuatro etapas para Bogotá y la Región Capital*. Informe para el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). 2011. Disponible en: Centro de Información del IDU, Calle 20, No. 9-20. Bogotá, Colombia.
- [2] Alcaldía Mayor de Bogotá. *Proyecto Corredor Verde – Solución Urbana Integral Carrera 7ª. Bogotá Positiva 2008-2012*. Bogotá. 2011. En: www.transmilenio.gov.co.
- [3] TransMilenio, S.A., Presentación Metro Ligero de Bogotá - versión 2. Diapositivas (119). 2012. En: www.transmilenio.gov.co.
- [4] Alcaldía Mayor de Bogotá. *Bogotá Humana – Movilidad Humana. Plan de Desarrollo 2012-2016*. Acuerdo 489/2012 del Concejo de Bogotá. p. 195. En: <http://idrd.gov.co/sitio/idrd/Documentos/PLAN-DESARROLLO2012-2016.pdf>.
- [5] Cámara de Comercio de Bogotá y Universidad de los Andes, *Observatorio de Movilidad 2014*, No. 8. 2015. Bogotá., Colombia.

- [6] Secretaría Distrital de Movilidad, *Informe de Rendición de Cuentas - Programa Movilidad Humana 2014*. Bogotá, Colombia. 2015. En www.movilidadbogota.gov.co.
- [7] Consejo Nacional de Política Económica y Social- CONPES de movilidad integral para la Región Capital. Departamento Nacional de Planeación – DNP. Bogotá, Colombia. 2013. En: <https://www.dnp.gov.co>.
- [8] Cámara de Comercio de Bogotá y Universidad de los Andes, *Observatorio de Movilidad 2014*, No. 8. Bogotá. 2015. p. 41.
- [9] Cámara de Comercio de Bogotá y Universidad de los Andes. *Boletín Especial Carrera 7ª*; No. 4. 16 p. Bogotá, Colombia. 2010. (ISSN 2027-1026).
- [10] L. Lesley, *Light Rail Developers' Handbook*, Fort Lauderdale, Fla., USA: Ross Publishing Inc, 2011 (ISBN 978-1-60427-048-8)
- [11] Y.R. Vuchic, *Urban Transit Systems and Technology*, Hoboken, N.J., John Wiley Inc. 2007 (ISBN 978-0-471-75823-5).
- [12] World Health Organization (WHO). International Agency for Research on Cancer, Press Release No. 213, June 12, 2012. En: www.iarc.fr/en/media.centre/iarcnews/.
- [13] Alcaldía Mayor de Bogotá, *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá (PDDAB)*. Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, TransMilenio S.A. y Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 2010.
- [14] E. Velandia, *Energía eléctrica, Alternativa energética para un transporte urbano sustentable en Colombia*, CODENSA, S.A., Bogotá, Colombia. 192 p., 2009 (ISBN 978-958-44-6016-5)
- [15] H. Carvajal-Osorio, M.F. Valdés, “Sostenibilidad en transporte masivo en condiciones limitantes, con implementación de tren ligero (LRT)”. Actas del 3er Congreso Internacional de Movilidad Urbana Sostenible-EIMUS, noviembre 2013, Lima, Perú. ASIMUS, Barcelona, España, en prensa.
- [16] J.G. Corredor, J.A. Misat, *Estudio de condiciones técnicas de estación elevada del sistema de transporte masivo avanzado de tren ligero – Carrera 7ª entre Calles 39 y 53*. Director: H. Carvajal-Osorio. Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. 2013.
- [17] J.E. Gaitán, J. Niño, *Espacio público para el tren eléctrico ligero en la carrera 7ª, entre calles 32 y 53*. Director: H. Carvajal-Osorio. Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. 2013
- [18] H. Carvajal-Osorio, Memorias III Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad La Gran Colombia, Bogotá, noviembre 2015, en prensa.
- [19] Caliper Corporation, *TransModeler - Traffic Simulation Software* - Catálogo. Newton, Ma., USA. 2011. En: www.caliper.com.
- [20] HDRI – Tutorial. En: www.hdritutorial.com/hdritutorial/como-iluminar-con-hdri-en-lightware-y-maxell-render/.
- [21] Department Of Transport – DOT . *Traffic Analysis Toolbox* Volumen III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software. En: http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisitools/tat_vol3/. 2014.
- [22] Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, Bogotá - Contrato IDU133-2005: Estudios y diseños de la Troncal Calle 26. Consorcio General. Bogotá, Colombia. 2005. En: www.idu.gov.co/web/guest/pmb/.
- [23] H. Díaz, Y.F. Martínez, *Intersecciones tipo diamante divergente, análisis de implementación en ciudades colombianas*. Monografía. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. 2011.
- [24] Caliper Corp. Autodesk Knowledge Network. Tutoriales. En: <https://knowledge.autodesk.com/support/>. (s.f.)
- [25] Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. *Cartilla para el puente peatonal prototipo para Bogotá*. (s.f.). Bogotá, Colombia. En www.idu.gov.co/web/guest/tramites_doc_manuales.
- [26] Velasco, Edwin J.E. *Modelo sistematizado del flujo vehicular transversal oriente-occidente en la Carrera 7ª, entre calles 34 y 53, en incorporación de sistema de transporte tipo tren ligero (LRT)*. Monografía, Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. 2014.
- [27] H. Carvajal-Osorio, Informe final del Proyecto BIM (Building Infrastructure Modeling). Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia. Bogotá. Colombia. 2015 (marzo). Sin publicar.