

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Análisis y simulación de tráfico en el Centro Histórico de la Ciudad de  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Rafael Alejandro Sinay Oliva para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

Guatemala

2023



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Análisis y simulación de tráfico en el Centro Histórico de la Ciudad de  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Rafael Alejandro Sinay Oliva para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil Industrial

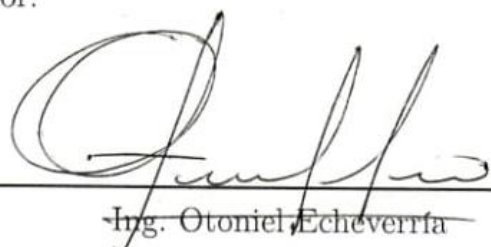
Guatemala

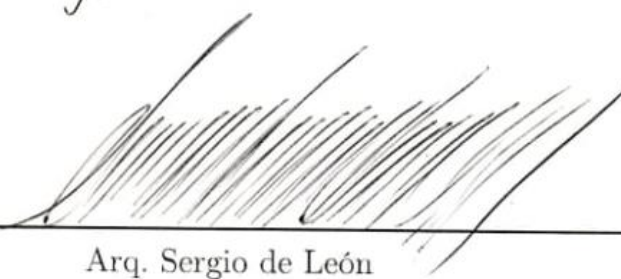
2023

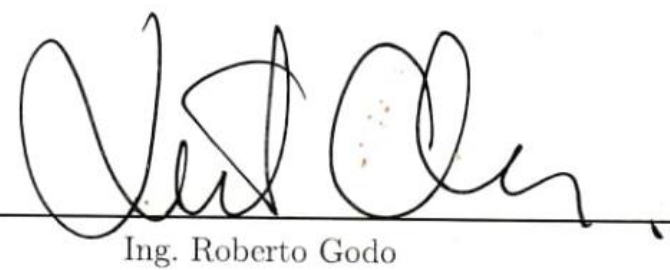
Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Otoniel Echeverría

Tribunal Examinador:

(f)   
~~Ing. Otoniel Echeverría~~

(f)   
Arq. Sergio de León

(f)   
Ing. Roberto Godo

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de enero de 2023.

Cuando era niño daba por sentado que “ingeniería” era un término que se acuñaba únicamente a la famosa “ingeniería civil”. Desde el origen del ser humano y la sociedad en general, ha sido necesario implementar infraestructura, carreteras y, principalmente, asegurar una vivienda; al ser la ingeniería civil conocida como “la madre de las ingenierías”, considero que es un buen término para una disciplina que siempre vela por dar una mejora en la sociedad.

El interés personal me trajo hasta esta carrera, principalmente, la parte relacionada con las estructuras. Sin embargo, desde pequeño quise hacer algo relacionado con las carreteras y el tráfico que se experimenta día con día. En el futuro, quiero seguir aprendiendo sobre ingeniería civil, pero no sé si tendré la oportunidad de involucrarme tanto en términos de urbanismo. Este proyecto busca indagar sobre qué se puede hacer por el tráfico en una de las zonas que transité durante algunos años, cuando mis padres me llevaban por el Centro Histórico.

Les dedico esta tesis mis amados padres Olinda y César, cualquier logro que he obtenido se los debo a ellos; a mi primos mayores por ser un gran ejemplo a seguir; a mis primos menores, Gabriela, Victoria, Kendra, Ezequiel, Santiago, Alondra, Esteban, Valery, Diego, Guissela, Alison, Ángela y Estuardito, que son mi alegría y motivación. Sin ustedes, nada de esto sería posible.

Agradezco a la Fundación Juan Bautista Gutiérrez, principalmente a Doña Isabelita, por creer en mí y apoyarme (en el 2017) le prometí que esta tesis iba a ser relacionada al tráfico y es en su honor que la he terminado. Al ingeniero, Fernando Paíz y su familia, e ingeniero Roberto Godo, por el voto de confianza y apoyo brindado. A los ingenieros Iván McDonald y Henry Castañeda por el apoyo en la recopilación de los datos. Finalmente, a mis familiares, tíos y abuelos; a mis catedráticos, amigos y personas que conocí y que fueron de gran apoyo antes, durante y después de este período.

Prefacio . . . . .	III
Índice . . . . .	IV
Listado de figuras . . . . .	VI
Listado de cuadros . . . . .	VIII
Resumen . . . . .	IX
Abstract . . . . .	X
I    Introducción . . . . .	1
II   Justificación . . . . .	3
III  Objetivos . . . . .	4
A    Objetivo general . . . . .	4
B    Objetivos específicos . . . . .	4
IV   Marco teórico . . . . .	5
A    Tráfico . . . . .	5
1    ¿Qué es el tráfico? . . . . .	5
2    Contexto guatemalteco . . . . .	6
B    Métodos para medición de tráfico . . . . .	6
1    Sensores en el pavimento . . . . .	7
2    Sistemas elevados . . . . .	7
3    Conteo manual . . . . .	7
C    Estructuras viales . . . . .	7
1    Carreteras . . . . .	7
2    Red vial nacional . . . . .	8
3    Intersecciones . . . . .	8
4    Paso a desnivel . . . . .	10
5    Redondeles . . . . .	10
D    Mejoras y soluciones . . . . .	11
1    Impacto social de los pasos a desnivel . . . . .	11
2    Urbanización . . . . .	12

	3	Otras soluciones . . . . .	12
E		Semaforización . . . . .	14
	1	¿Qué es un semáforo? . . . . .	14
	2	¿Cómo funciona un semáforo? . . . . .	15
	3	Sincronización de semáforos . . . . .	16
F		Análisis de tráfico . . . . .	20
	1	Capacidad vial y niveles de servicio . . . . .	20
	2	Ingeniería de tráfico . . . . .	22
	3	Teorías de tráfico . . . . .	23
	4	Gestión de tráfico . . . . .	26
	5	Planificación urbana . . . . .	26
G		Valores estadísticos . . . . .	28
	1	Media, mediana y moda . . . . .	28
	2	Precisión y exactitud . . . . .	29
H		Software de simulación . . . . .	29
	1	SIMIO . . . . .	29
	2	Synchro Studio . . . . .	30
	3	InfraWorks . . . . .	31
V		Metodología . . . . .	32
A		Medición . . . . .	32
	1	Recolección de datos . . . . .	32
	2	Verificación de datos . . . . .	33
	3	Interpretación de datos . . . . .	33
B		Simulación . . . . .	34
	1	Modelado en software . . . . .	34
	2	Validación del modelo . . . . .	37
	3	Generación de propuestas . . . . .	37
VI		Resultados . . . . .	38
VII		Conclusiones . . . . .	48
VIII		Recomendaciones . . . . .	49
IX		Referencias . . . . .	50
X		Anexos . . . . .	52
A		Figuras del modelo de Infracworks . . . . .	52
B		Figuras del modelo de SIMIO . . . . .	65
C		Datos de la Municipalidad de Guatemala . . . . .	69

---

## Listado de figuras

---

Figura 1:	Niveles de servicio en función del volumen y capacidad. . . . .	21
Figura 2:	Esquema de Manheim 1. . . . .	24
Figura 3:	Esquema de Manheim 2. . . . .	25
Figura 4:	TTiempo de fase del semáforo. . . . .	33
Figura 5:	Delimitación del Centro Histórico(zona 1). . . . .	34
Figura 6:	Ciclo 1 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1. . . . .	39
Figura 7:	Ciclo 2 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1. . . . .	39
Figura 8:	Ciclo 3 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1. . . . .	40
Figura 9:	Ciclo 4 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1. . . . .	40
Figura 10:	Modelo de simulación. . . . .	41
Figura 11:	Zona de estudio. . . . .	52
Figura 12:	Delimitación de la zona de estudio. . . . .	53
Figura 13:	Centro Histórico cargado en Infracworks. . . . .	53
Figura 14:	Calle para análisis del Centro Histórico . . . . .	54
Figura 15:	Centro Histórico en Infracworks. . . . .	54
Figura 16:	Análisis de tráfico en Infracworks. . . . .	55
Figura 17:	Caracterización típica de una calle. . . . .	55
Figura 18:	Caracterización típica de una intersección. . . . .	56
Figura 19:	Caracterización de vehículos. . . . .	56
Figura 20:	Caracterización del tipo de intersección. . . . .	57
Figura 21:	Caracterización de los giros permitidos. . . . .	57
Figura 22:	Intersección modificada en Infracworks. . . . .	58
Figura 23:	Zona de prueba de simulación . . . . .	58
Figura 24:	Zona a simular en Infracworks . . . . .	59
Figura 25:	Intersección analizada . . . . .	59
Figura 26:	Ajuste del comportamiento vehicular . . . . .	60
Figura 27:	Semaforización y señalización para simulación 1 . . . . .	60
Figura 28:	Semaforización y señalización para simulación 2 . . . . .	61
Figura 29:	Calle de estudio. . . . .	61
Figura 30:	Programación de horario para simulación . . . . .	62
Figura 31:	Distribución por tipo de automóviles . . . . .	62
Figura 32:	Simulación de una intersección típica . . . . .	63

Figura 33: Programación de semáforos . . . . .	63
Figura 34: Modelo completo para análisis . . . . .	64
Figura 35: Disposición de elementos en SIMIO . . . . .	65
Figura 36: Disposición de elementos en SIMIO (Modelo realista) . . . . .	65
Figura 37: Elemento de recorrido o carretera. . . . .	66
Figura 38: Ruta planificada para la intersección estudiada . . . . .	66
Figura 39: Resultados tras la simulación propuesta. . . . .	67
Figura 40: Vista 3D de la intersección en SIMIO . . . . .	67
Figura 41: Caracterización de los tipos de transporte analizados. . . . .	68
Figura 42: Semaforización intersección 2.a avenida y 5.a calle zona 1. . . . .	69

---

## Listado de cuadros

---

Cuadro 1: <i>Distribución de ciclos lunes a viernes - 2.a avenida 5.a calle, zona 1 . . . . .</i>	38
Cuadro 2: <i>Distribución de ciclos sábado y domingo - 2.a avenida 5.a calle, zona 1 . . . . .</i>	38
Cuadro 3: <i>Colas generadas sobre la 3.a avenida - Estado actual . . . . .</i>	42
Cuadro 4: <i>Delay generado sobre la 3.a avenida - Estado actual . . . . .</i>	43
Cuadro 5: <i>Colas generadas sobre la 3.a avenida - Ola verde 12s . . . . .</i>	44
Cuadro 6: <i>Colas generadas sobre la 3.a avenida - Ola verde 15s . . . . .</i>	45
Cuadro 7: <i>Colas generadas sobre la 3.a avenida - Ola roja . . . . .</i>	46
Cuadro 8: <i>Comparación entre propuestas . . . . .</i>	47

La congestión vehicular se ha convertido en un problema crítico en la Ciudad de Guatemala. Según el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS), el tráfico genera estrés, lo que a su vez provoca dolores de cabeza, tensión muscular y problemas digestivos (República, 2019).

Abordar la congestión vehicular es un desafío complejo. A pesar de los esfuerzos gubernamentales, las soluciones suelen ser temporales, ya que la demanda de transporte aumenta continuamente mientras que la infraestructura permanece sin cambios. El crecimiento de la población urbana y la centralización industrial contribuyen a niveles más altos de tráfico, ya que más personas migran a la ciudad, exacerbando aún más la congestión (Hora, 2017).

Otro factor es la ineficiencia del transporte público, que lleva a las personas a optar por vehículos privados y motocicletas. La accesibilidad económica de estas alternativas ha incrementado significativamente el número de vehículos en la ciudad (F. Pérez et al., 2014).

Este estudio tiene como objetivo identificar las áreas de alto tráfico y proponer soluciones para el Centro Histórico zona 1 de la Ciudad de Guatemala. Los datos se recopilaron a partir de los registros existentes de los tiempos de fase de los semáforos en las intersecciones. La información, obtenida de la Municipalidad de Guatemala, fue analizada para extraer valores significativos para la simulación (SIMIO, 2019).

Se utiliza software de simulación para modelar varios escenarios y evaluar posibles soluciones. Se prueban varias opciones de software utilizando los datos municipales para seleccionar la más adecuada en función de su rendimiento y compatibilidad con el conjunto de datos.

Finalmente, el estudio incluye información esencial para facilitar la comprensión del análisis de datos y la simulación. El objetivo es garantizar la accesibilidad para los lectores sin conocimientos previos sobre simulaciones de tráfico.

Palabras clave: Congestión vehicular, Ciudad de Guatemala, tráfico urbano, transporte público, infraestructura vial, simulación de tráfico, Centro Histórico, Zona 1, datos municipales, modelado por simulación, software de simulación, intersecciones semaforizadas, análisis de datos.

Traffic congestion has become a critical issue in Guatemala City, negatively affecting the population. According to the Guatemalan Institute of Social Security (IGSS), traffic induces stress, which in turn causes headaches, muscle tension, and digestive problems (República, 2019).

Addressing traffic congestion is complex. Despite governmental efforts, solutions are often temporary, as the demand for transportation continuously increases while infrastructure remains unchanged. Urban population growth and industrial centralization contribute to higher traffic levels, as more people migrate to the city, further exacerbating congestion (Hora, 2017).

Another factor is the inefficiency of public transportation, which leads people to opt for private vehicles and motorcycles. The affordability of these alternatives has significantly increased the number of vehicles in the capital city (F. Pérez et al., 2014).

This study aims to identify high-traffic areas and propose solutions for the Historic Center of Zone 1, Guatemala City. Data will be collected from existing records of traffic light phase times at intersections. The information, obtained from the Municipality of Guatemala, will be analyzed to extract meaningful values for simulation (SIMIO, 2019).

Simulation software will be utilized to model various scenarios and evaluate potential solutions. Several software options will be tested using municipal data, and the most suitable one will be selected based on performance and compatibility with the dataset.

Finally, the study includes essential information to facilitate comprehension of data analysis and simulation. The objective is to ensure accessibility to readers without prior knowledge of traffic simulations.

Keywords: Vehicle congestion, Guatemala City, urban traffic, public transportation, road infrastructure, traffic simulation, Historic Center, Zone 1, municipal data, simulation modeling, simulation software, signalized intersections, data analysis.

En la sociedad guatemalteca actual, se ha propagado un fenómeno que ha llegado a perjudicar a sus diferentes miembros de la población: el tráfico. Como lo ha mencionado el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS), trae consigo consecuencias negativas, por ejemplo, estrés. Debido a este se generan diferentes efectos negativos, tales como dolor de cabeza, tensión muscular y diferentes molestias estomacales (República, 2019).

El tráfico no es un problema sencillo y fácil de tratar; diferentes gobernantes han tratado de enfrentarlo, pero la solución propuesta es temporal y, tras unos años, surge nuevamente. Esto se debe a que hay un constante crecimiento en la demanda de transporte y la oferta disponible, por ejemplo: las carreteras siguen siendo las mismas. El crecimiento poblacional está totalmente ligado a la cantidad de tráfico al que se tendrá que enfrentar la infraestructura existente. Además, la centralización del sector industrial ha obligado a diferentes personas a migrar hacia la ciudad o lugares aledaños. Por dicha razón, la cantidad de personas que requieran transportarse dentro de la ciudad no disminuirá en el futuro cercano; al contrario, aumentará (Hora, 2017).

El crecimiento poblacional no es el único factor que se encarga de generar tráfico. El sistema de transporte público no es muy atractivo a la población y existen otras alternativas a las cuales las personas son capaces de acceder. Estas suelen ser automóviles de bajo precio o motocicletas. Este es uno de los principales factores que han aumentado la cantidad de vehículos que transitan dentro de la ciudad (F. Pérez et al., 2014).

En respuesta a la problemática, se presenta el siguiente trabajo de graduación, el cual tiene como objetivo identificar los puntos con mayor afluencia vehicular y presentar una solución para el Centro Histórico (zona 1) de la Ciudad de Guatemala. Para que se lleve a cabo dicho análisis, se utilizan datos de intersecciones del Centro Histórico, específicamente, los tiempos en cada semáforo actual.

Para obtener los datos es necesario solicitarlos en la Municipalidad de Guatemala. Los datos se identifican bajo el nombre de tiempos de fase de la semaforización del Centro Histórico. Los datos obtenidos se clasifican para luego ser analizados para obtener valores útiles en la simulación del software (SIMIO, 2019).

Posterior al análisis de los datos obtenidos, se hará uso de un software de simulación, el cual permita la simulación de diferentes escenarios. Este factor será de suma utilidad al momento de presentar los resultados del estudio. Se realizarán diversas propuestas de alternativas en forma de soluciones y el efecto que tendrán en el Centro Histórico de la ciudad capital.

La selección del software de simulación, se realizarán diferentes pruebas con los datos proporcionados por la Municipalidad de Guatemala. En función de las pruebas obtenidas, se seleccionará el software que se adapte de mejor manera al tipo de datos. De esta manera, se obtendrá el software óptimo para el Centro Histórico.

Por último, el trabajo se complementa con la información necesaria para que el lector sea capaz de entender el análisis de datos y la simulación que se llevará a cabo. De esta forma el trabajo será comprendido de manera fácil y sencilla, sin necesidad de tener algún conocimiento específico sobre las simulaciones.

Debido a la centralización de actividades económicas en Guatemala, principalmente la ciudad capital, el tráfico ha sido uno de los factores que más ha aumentado en los últimos años. Sectores como el Centro Histórico de la zona 1 de la ciudad de Guatemala, se ven afectados al ser una zona donde se encuentra el Palacio Nacional, el Parque Central, la Catedral Metropolitana y demás entidades. De igual manera, es un punto donde existe una primacía de servicio que conllevan a un alto flujo de personas (Lozano et al., 2003).

En Guatemala es importante realizar un análisis referente al tráfico porque afecta a la gran mayoría de la población, ya sea de forma directa o indirecta. Aunque ya se mencionaron las consecuencias del tráfico, es importante comprender que el problema tiene efectos sobre las personas y la sociedad. Realizar un análisis de este tipo permite plantear soluciones con diferentes escenarios. Se espera que con el modelo generado se reduzca el tiempo que las personas pasan en su vehículo, evitando gastos innecesarios de gasolina y una mejora en el uso que se le da a la infraestructura actual, reacondicionando el flujo de tráfico vehicular. Además, se tiene un primer acercamiento a la planificación urbana con el fin de prever saturaciones vehicular futuras, en Guatemala (F. Pérez et al., 2014).

Por dicha razón, es necesario contrarrestar la afluencia vehicular generada. Para ello, se realizará un estudio mediante el análisis de datos y uso de metodologías de simulación, con el software que más se adecúe a los datos existentes. Se utilizará un software de simulación debido a la alta variedad de procesos que son capaces de simular. Además, presentan la ventaja de generar un análisis "nodal", lo que permitiría simular las intersecciones de las calles y avenidas, para analizar cómo el flujo de tráfico se divide por las mismas. Los software de simulación permiten realizar un análisis global de la zona analizada y si existe algún cambio en un punto específico, se analizan los efectos de manera general (SIMIO, 2019).

El principal beneficio de este trabajo de graduación es que se generará un modelo original que sirva como referencia para las diferentes zonas de la ciudad, o incluso en diferentes regiones del país. De esta manera, se busca un beneficio en la disminución del tráfico, bajo la simulación de diferentes situaciones para encontrar la alternativa que mejor se adapte al estado actual.

#### **A. Objetivo general**

Proponer una solución para las intersecciones en el Centro Histórico de la Ciudad de Guatemala.

#### **B. Objetivos específicos**

- Recolectar datos de las intersecciones, con información existente del Centro Histórico de la Ciudad de Guatemala.
- Analizar estadísticamente el comportamiento vehicular en el Centro Histórico de la Ciudad de Guatemala.
- Construir un modelo informático con la ayuda de software de simulación.
- Evaluar diferentes soluciones y seleccionar la configuración óptima, para las intersecciones del Centro Histórico.

## A. Tráfico

### 1. ¿Qué es el tráfico?

El flujo vehicular es un fenómeno que se puede presentar en diferentes situaciones y diferentes lugares. Flujo vehicular es uno de los nombres que se le puede asignar al tráfico vehicular, tránsito vehicular o únicamente, tráfico. Hace referencia al fenómeno que se origina por el flujo de vehículos que se presenta en una calle, autopista, etc. Muchas ciudades se enfrentan a este fenómeno y la razón principal, es que la infraestructura con la que se cuenta es insuficiente para la demanda que es solicitada (Pedraza et al., 2013).

Uno de los principales causantes del tráfico, es la centralización de la actividad económica. Por ejemplo, en Guatemala se encuentran las principales zonas financiera e industriales dentro de la ciudad. Esto ha aportado mucho a que las personas deban desplazarse dentro del perímetro cercano a la ciudad. Por tal razón, esta población que se ha desplazado requiere de un método de transporte para llegar a su lugar de trabajo. Además, los productos que la población requiere para consumo propio, o para ser producido, también requiere del medio de transporte. Mientras más centralización exista, el tráfico nunca dejará de existir (Lozano et al., 2003).

Sin ser suficiente con el tráfico generado, este trae consigo diversas consecuencias. Uno de estos efectos es la contaminación que genera. No solamente genera contaminación ambiental como es fácil imaginar con el transporte público que se encuentra en un pésimo estado en Guatemala, con el smog generado. La contaminación visual, y auditiva también está latente y puede llegar a tener consecuencias en las personas. El estrés es uno de los factores más importantes que deben ser solucionados en conjunto al tráfico. Por último, al tener más personas en las carreteras, también aumenta la probabilidad de generar algún accidente, que traerá consigo más tráfico (Vela, 2008).

## 2. Contexto guatemalteco

### 2.1. Centro Histórico - Ciudad de Guatemala

El área de estudio para este trabajo de graduación está fijado para el Centro Histórico de la Ciudad de Guatemala. Sobre la historia del Centro Histórico, vale la pena mencionar que se formó en el año 1776 en la Nueva Guatemala de la Asunción. Posteriormente al asentamiento de la ciudad en dicho lugar, se comenzó con la expansión de la ciudad de Guatemala. El Centro Histórico como tal, comprende la traza urbana en forma de malla o retícula, que inicialmente pertenecía a la ciudad de Guatemala originalmente. Por dicha razón, se puede apreciar con facilidad el trazo ajedrezado que tiene este sector de la ciudad capital. Cabe destacar que dicho trazo es una de las principales razones por las cuales se delimitó la zona de estudio a este punto; esto es debido a que la traza urbana que el Centro Histórico posee, es fácilmente adaptable en cualquier software de simulación (de Guatemala, s.f.).

Dentro del Centro Histórico se pueden encontrar diferentes edificaciones emblemáticas para Guatemala, tales como el Palacio Nacional de la Cultura, la Catedral, el Portal del Comercio, el Hipódromo del Norte, la Municipalidad de Guatemala, el Mapa en Relieve y el Edificio de Correos, el Palacio de la Policía, el Museo del Ferrocarril, entre muchos otros lugares, como la 6ta avenida. Dichos lugares generan cierta cantidad de movimiento de personas lo que implica un aumento en el tráfico vehicular. Además, al ser un sitio con una alta cantidad de lugares de visitas y con una centralización de las actividades políticas y económicas, el flujo de personas que atienden al lugar, es bastante alto (de Guatemala, s.f.).

Actualmente dentro de la Municipalidad de Guatemala se cuenta con un departamento exclusivo para el Centro Histórico. Esto es debido a que es un sitio reconocido como Patrimonio Cultural de la Nación. El departamento del Centro Histórico busca conservar y recuperar e patrimonio tanto, tangible como intangible. Además, busca mantener el valor simbólico contenido en el Centro, desde los diferentes puntos de vista. Estos pueden ser culturales, sociales, urbanos y hasta políticos y económicos. Es el ente que se encarga de la gestión y planificación de cualquier acción que se relaciones con el Centro Histórico. Además, es un intermediario al momento de generar cualquier inversión ya sea nacional o interacional, o bien, pública y privada (de Guatemala, s.f.).

En palabras del Ing. Henry Casteñeda, el Centro Histórico es un sitio que, además del valor histórico y turístico que ofrece, es el encargado de brindar una primacía de servicios para la población. Con esto se hace mención principalmente a trámites, gestiones, comercio y turismo. Esto implica una necesidad de los pobladores a transportarse dentro del Centro Histórico, para luego retirarse de nuevo a su destino. Considerando que las personas que visitan el Centro Histórico no residen en él, se tienen que movilizar hacia fuera generando así, movimientos pendulares que son una de las causas del tráfico dentro del Centro Histórico (Castañeda, 2021).

## B. Métodos para medición de tráfico

Dado que el tráfico en sí no es una variable cuantitativa como tal, que presenta una dimensional como sí lo tiene la longitud, temperatura, etc. Existen diferentes formas de caracterizarlo.

## 1. Sensores en el pavimento

Para su ejecución es necesaria una manguera neumática, que es un sensor que detecta cuando un vehículo pasa por encima. Cuando esto sucede, la presión generada por el peso del vehículo genera un impulso y esto se registra. Es funcional para rangos o intervalos de medición y en tránsitos fluidos. Debe ser cubierta y protegida correctamente, ya que puede ser arrastrada, dañada o rota debido a la movilidad a la que es expuesta (Kineo, s.f.).

## 2. Sistemas elevados

Este tipo de sistemas funciona a base de sensores de láser infrarrojo que se posicionan en un rango de 5m a 12m de altura. Se detectan las imágenes que pasan frente a los sensores y se lleva a cabo el conteo vinculado al software con el cual esté vinculado el sensor. Son utilizados en zonas urbanas y presentan muchísima más información que la manguera neumática. Con este se pueden obtener los valores de la cantidad de autos que transitan, la velocidad con la que se desplazan, las dimensiones de cada auto, el número de placa (por fotografía), etc (Kineo, s.f.).

## 3. Conteo manual

El conteo manual es el más sencillo de los que se mencionan en este marco teórico. La razón es debido a que únicamente se necesita de la pericia humana para contar la cantidad de autos que transitan en una avenida, calle, o el sitio que se esté evaluando. Se requiere de una tabla de conteo con el parámetro específico a evaluar, tal como cantidad de autos, dirección en la que circula y hacia donde vira, entre otros.

# C. Estructuras viales

## 1. Carreteras

Según la Real academia de la lengua española, el término “carretera” se refiere a “camino público, ancho y espacioso, pavimentado y dispuesto para el tránsito de vehículos” (Real Academia Española, 2020a). La carretera es un la vía que tiene uso público, con el fin de permitir un flujo o circulación de vehículos en ella. Conecta el acceso público con las propiedades privadas. Presentan una diferencia en comparación a un camino, debido a que el factor que importa, es la circulación del transporte en ella. Las carreteras tienen su origen desde el imperio romano, ya que aún existen los vestigios en buen estado de la red de carreteras que se construyeron en ese entonces (Webscolar, 2020).

Las carreteras tienen cierta clasificación según la tipología de vías. Con la vía se hace referencia a la cantidad de carriles que se tienen en la carretera, a las dimensiones geométricas (físicas), y al tráfico que soportan. Para ello, se consideran diferentes tipos de vías y rutas. En Guatemala, las rutas se pueden categorizar como centroamericana, nacional y departamental. La Centroamericana hace referencia a las rutas denominadas de primer orden, ya que tienen un nivel de servicio alto, permite la comunicación entre países vecinos de C.A. y permiten la conexión de puertos marítimos,

rutas y red vial nacional. Además, permite el acceso desde las fronteras hacia la capital y cuentan con la mejor condición de diseño en función de la topografía del terreno (Castañeda, 2021).

Las rutas nacionales contemplan las interconexiones de departamentos, cabeceras municipales y suelen derivarse a partir de las centroamericanas. Tienen un impacto significativo con el comercio, ya que conectan los puntos comerciales importantes para el país. Fungen como rutas auxiliares a las rutas centroamericanas. Por último, la ruta departamental, como su nombre lo indica, conectan los departamentos entre sí, y las regiones del país con la red principal y secundaria. Suelen ser rutas alternas en caso de emergencia (Castañeda, 2021).

## 2. Red vial nacional

La red vial nacional se refiere a un conjunto de carreteras y caminos públicos que están normados por el marco institucional nacional y centroamericano. Está conformada por redes viales primarias, secundarias y terciarias. Esta es una clasificación que se denomina como una categorización por función. Para ello, primero se debe tener claro que existen regiones departamentales, las cuales son: metropolitana, norte, nororiente, suroriente, central, suroccidente y noroccidente (CIV, 2021).

La red vial primaria es aquella que busca facilitar y fortalecer la comunicación entre regiones departamentales. Según el glosario del CIV, lo hace mediante las regiones políticas que están establecidas en el decreto 70-86 de la Ley Preliminar de Regionalización. Permite la comunicación de los puertos marítimos y las fronteras hacia otros países. Por su parte, la red vial secundaria es el complemento de la primaria; permite la comunicación regional y principalmente entre cabeceras departamentales vecinas. Conecta puntos con mayor población (o producción) y genera vías alternas, como complemento. Por último, la terciaria se vuelve la parte complementaria de las anteriores; comunica las cabeceras departamentales, con las municipales y con las aldeas dentro del departamento. Permite que exista comercio y movilización desde dentro hacia fuera del departamento y viceversa (CIV, 2021).

## 3. Intersecciones

La intersección se define como un punto crítico donde se encuentran vehículos de diferentes trayectorias y en ese preciso lugar, se encuentran. Se define a la intersección como la parte más importante de una red vial urbana, porque controla la velocidad de circulación, qué tan eficiente es la intersección y la seguridad de la misma. Al momento en que se diseña una intersección, se busca mejorar el flujo de tráfico, disminuir la congestión en los puntos más concurridos y brindar seguridad y confort a las personas que utilicen la vía urbana para desplazarse (Fraile, 2018).

La intersección tiene un área funcional, que está delimitada por el espacio físico donde es capaz de generar algún efecto. Puede ser en cualquier dirección de la carretera, si es que existe algún carril auxiliar también se ve afectado. Para determinar el área funcional de la aproximación de una intersección se tienen que analizar tres principales elementos. Estos son: distancia de percepción-reacción, la distancia en la que se genera la maniobra y la de cola de almacenamiento (Pinos, 2016).

La distancia recorrida durante la percepción-reacción y el tiempo, dependen directamente de la velocidad a la cual se está desplazando el vehículo. También depende de los factores tales como, la atención del conductor al manejar y qué tan familiarizado está el conductor con el sitio por donde

maneja. Si existen carriles a la derecha o izquierda, para la distancia de la maniobra se tiene que considerar la distancia en la cual se aplica el freno y se cambia de carril. Si no existe algún carril de giro, únicamente se considera un frenado de parada (detener el auto) cómoda. El almacenamiento se refiere al espacio físico sobre el cual se desplaza la cola más larga a la hora más crítica. Por lo tanto, el almacenamiento debe ser capaz de soportar esta misma.

Para determinar qué tipo de intersección se debe implementar, se debe tomar en cuenta el nivel de la jerarquía que poseen las vías que convergen en la intersección analizada. Se debe considerar la distancia mínima que existe entre una intersección y la otra, esto permite garantizar el buen funcionamiento de la intersección. También se considera la disponibilidad física y el tipo de terreno que se tiene para poder construir la intersección. Por último, considerar cuales son los impactos que se tendrán en el entorno y buscar la manera de mitigarlos (Pinos, 2016).

### 3.1. Intersecciones sin sistema de regulación

Se define de esta manera a las intersecciones que no presentan niveles de servicio muy altos. La circulación en ella es fluida y permite que los vehículos se desplacen libremente, sin detenerse mucho tiempo. Son comunes en volúmenes de tráfico pequeños. Dentro de las más comunes se encuentran las intersecciones de tres y cuatro ramales.

Las de tres ramales, también llamadas intersecciones en “T”, permiten el cruce de carreteras secundarias, en las cuales el volumen de tráfico es bajo. Este tipo de intersecciones suelen presentar elementos llamados canalizadores, que permiten que el conflicto al momento de girar, sea disminuido. Existen 6 posibles desplazamientos que se pueden dar, por lo que el conflicto se ve bastante reducido (Pinos, 2016).

Por su parte, la intersección de cuatro ramales, se utiliza cuando las carreteras son consideradas como locales, o de menor importancia. Las carreteras principales se ven alimentadas de las calles secundarias a través de este tipo de intersección. Para evaluar la “forma” de la intersección se toma en cuenta que no debe tener más de 30 grados, respecto a la perpendicular de los ramales.

Este tipo de intersección (sin sistema de regulación) permite un diseño fácil con menos ocupación de suelo y costos más bajos. Sin embargo, presenta la desventaja que es susceptible a accidentes en los puntos de mayor conflicto. Esto sucede cuando hay carriles que se incorporan a las carreteras; si no se tiene algún sistema de control, los accidentes se volverán más frecuentes (Pinos, 2016).

### 3.2. Intersecciones semaforizadas

Este tipo de intersección surge como prevención de accidentes, los cuales son comunes cuando no hay dispositivos de control. Para llevar a cabo una semaforización, se debe tomar en cuenta el volumen de tráfico que se maneja en la intersección, el tipo de movimientos, los flujos vehiculares y los intervalos de tiempo que permiten mayor fluidez vehicular. Para la fluidez vehicular, se debe tomar en cuenta el concepto de “ondas verdes”, que consiste en realizar configuraciones en los ciclos que presentan los semáforos para tener un desplazamiento libre a lo largo de varias intersecciones. Las ondas verdes están dadas en relación a la distancia mínima que hay entre las intersecciones, o bien, ejes de acceso o salida (Pinos, 2016).

La principal ventaja de utilizar las ondas verdes es que se puede regular la velocidad a la que se desplazan los vehículos que se dirigen hacia la intersección. Las intersecciones semaforizadas permiten regular el tránsito en función de la prioridad que tiene cada una. Para ello, se debe tener un reporte de los volúmenes de tráfico que permita identificar los ciclos de los semáforos. Como desventaja principal, es que se debe dar un continuo mantenimiento a los semáforos, lo cual implica un aumento en los costos que se deben considerar al momento de diseñar la intersección (Pinos, 2016).

#### 4. Paso a desnivel

Un paso a desnivel es una estructura en la cual se ha adaptado uno o más cruces de ejes de transportes, pero en diferente nivel o altura, con el fin de evitar la interrupción de tráfico entre otras rutas de tránsito, cuando existe un cruce entre las mismas. Los ejes de transporte no forzosamente deben ser uniformes, ya que están constituidos de caminos, senderos, vías férreas, canales, pista de aeropuertos, puentes, túneles, etc. La principal característica de los pasos a desnivel es que exista cierta separación entre los cruces a diferente altura. Se debe tener sumo cuidado con su identificación y señalización. Debido a que, al tener una altura elevada, pueden ocurrir accidentes que terminen afectando a los vehículos que circulan en niveles inferiores. Por lo tanto, deben ser señalados correctamente, utilizar barreras en la parte superior y, en ocasiones, semaforizar; esto último ocurre con mayor frecuencia cuando existe alguna vía férrea (Akademik, 2010). Se debe mencionar que los pasos a desnivel están contruidos como un puente, con sub- y superestructura. En el puente, se permite el paso del tráfico de manera elevada, ya sea con otra vía por abajo, o bien, por fenómenos topográficos como ríos, barrancos, etc.

Estos puentes generalmente son diseñados en concreto reforzado, para mayor durabilidad, resistencia; seguridad, y que el mantenimiento sea simple y visualmente atractivo. Se debe mencionar que si la luz del puente es muy grande, se opta por utilizar acero preesforzado. Si se realiza algún corte del suelo para generar una nueva vía de tránsito, o si hay laderas, los pasos a desnivel deben tener muros de contención para soportar el empuje lateral del material. Además, el paso a desnivel debe brindar seguridad al peatón que transita en el mismo y también a los pilotos que conducen en él. La señalización debe indicar una reducción de velocidad y también los puntos en los cuales se cede el paso al peatón. Por último, deben contar con los sistemas de servicio. Entre estos se encuentran los drenajes, para evitar la acumulación de agua pluvial (lluvia) y si existen corrientes subterráneas se debe proteger correctamente la cimentación. Los demás servicios con los cuales debe contar, son las barandillas, bordillos, señalización y en ocasiones, acera para peatones (Camereros, 2004).

#### 5. Redondeles

Los redondeles también reciben el nombre de “rotonda” y engloba las estructuras que tienen forma circular (visto en planta). Se utilizan generalmente en el cruce de distintos caminos para reducir el riesgo de producir accidentes. Otros nombres que recibe puede ser óvalo o glorieta. Estos redondeles son utilizados en las intersecciones de avenidas y calles, para que se comuniquen entre sí por un círculo concéntrico. La vía tiene el redondel y las demás vías alimentan dicha vía. La principal ventaja de la rotonda radica en que es un regulador de tráfico, y esta disminuye la velocidad con la cual se desplazan los conductores, en función del propio radio de la rotonda.

Una rotonda en sí, es una intersección especial en la cual convergen diferentes tramos viales que se comunican por el anillo (rotonda) generando una circulación rotatoria. La rotonda siempre se utiliza en sentido horario, exceptuando los países que tienen autos que se conducen por el lado derecho. Además, como regla principal, cualquier vehículo que circule dentro de la rotonda, tiene prioridad en la vía, respecto a los que circulan por las demás vías (J. Pérez & Gardey, 2016).

Dentro de sus ventajas, se puede encontrar que la rotonda obliga a disminuir la velocidad de circulación, porque si no se cumple la velocidad indicada, entonces el cargo volcaría. En estos casos, es preferible tener velocidades controladas, para evitar que se detenga la circulación del tráfico. Cabe mencionar, que las rotondas son estructuras viales que se prestan fácilmente a ser diseñadas desde un punto de vista artística, y muchas veces cuenta con esculturas y estatuas para agregarle mayor expresión artística. Su principal desventaja radica en la incorporación y desalojo de la rotonda, ya que algunos conductores pueden tener dificultades en hacerlo y es más difícil al tener un tráfico muy grande.

Si se realiza una comparación con los semáforos en las intersecciones, la principal desventajas de estos, es que los conductores pueden no respetar las fases y por lo tanto, generar tráfico. Por otro lado, como ya se mencionó, los redondeles disminuyen la velocidad sin que el conductor lo note explícitamente, como sí sucede en los semáforos. Por lo tanto, al reducir la velocidad de circulación, se disminuye el riesgo de sufrir un accidente (J. Pérez & Gardey, 2016).

## D. Mejoras y soluciones

### 1. Impacto social de los pasos a desnivel

Los pasos a desnivel son conocidos porque se utilizan como una solución rápida y sencilla para los puntos con mayor afluencia vehicular. El paso a desnivel consiste en dirigir diferentes vías en una altura específica, esto con el fin de evitar que haya una interrupción entre las rutas. En Guatemala es muy común ver este tipo de proyectos, dado que en los últimos 10 años en la Ciudad de Guatemala se autorizaron 13 pasos a desnivel con el fin de mitigar el impacto vial que se genera debido al tráfico vehicular.

Según el periódico “La Hora” quienes han preguntado a diferentes especialistas, este tipo de obra en lugar de disminuir el tráfico, lo aumenta. Sin embargo, una de sus principales características es el elevado costo que representa construir una de estas obras ingenieriles. En Guatemala se han invertido desde Q8.4 millones hasta Q41.1 millones, para llevar a cabo la construcción de los pasos a desnivel. Estas soluciones ciertamente regulan el tráfico, pero no lo hacen permanentemente y en poco tiempo vuelven a estar saturadas las carreteras(Hora, 2017).

El tráfico no es un problema que se pueda tratar fácilmente, sin embargo, se pueden hacer mejoras progresivas. De esta manera se puede mitigar por etapas el tráfico, presentando propuestas complementarias entre sí. Sin embargo, el problema radica en que los proyectos toman mucho tiempo y tras finalizarlo, no se continúa. Esta es la principal razón por las cuales los pasos a desnivel en lugar de disminuir el tráfico, a mediano y largo plazo, lo aumentan.

## 2. Urbanización

Según la Real Academia de la Lengua Española (RAE), urbanizar se refiere a “Acondicionar una porción de terreno y prepararlo para su uso urbano, abriendo calles y dotándolas de luz, pavimento y demás servicios” (Real Academia Española, 2020b). En la actualidad, la urbanización es algo que está ocurriendo y que no se detiene. La urbanización consiste en concentrar las actividades económicas de un sector de la población, y a la población en sí, en un contexto de ciudad en comparación al rural. Tiene sus orígenes desde la revolución industrial; ha permitido el desarrollo de los países que son grandes potencias hoy en día, aunque también en los países de escasos recursos.

Desde el siglo XX se estima que más del 54 por ciento de la población total del mundo residen en una zona urbana y no rural. La urbanización va de la mano con la globalización y la revolución tecnológica que busca migrar totalmente al área urbana. La urbanización tiene dos derivaciones que son la sustentable y la no sustentable. Como el nombre indica, la principal diferencia es la minimización en el impacto ambiental como resultado de los procesos y medios de vida urbana (Raffino, 2020).

Se puede generalizar como si la urbanización surge en respuesta al crecimiento poblacional que se ha dado a lo largo de los años. También como respuesta a la industrialización masiva que genera nuevas plazas laborales y que requieren mano de obra, maquinaria y personal encargado del negocio. Requerimientos de niveles de vida de mayor calidad, con mejores servicios básicos y mayor capacidad adquisitiva de las personas (Raffino, 2020).

El crecimiento poblacional y el desarrollo urbano van de la mano, por lo tanto, los servicios básicos deben ser satisfechos de la mejor manera posible. Se permite una mejor red de carreteras, servicios de transporte y facilidad de desplazamiento para las diferentes personas. Cada persona tiene más opciones de trabajo en comparación a las zonas rurales, por lo que se generan especialistas en diferentes áreas. Sin embargo, también existen desventajas tales como la disminución de la población en sectores rurales, con notorias diferencias económicas entre ambos ámbitos (rural y urbano). También hay un gran efecto en el impacto ambiental, debido a que hay mayor contaminación en el aire, agua y tierra, además del tráfico, basura y ruido generados. Estas consecuencias repercuten directamente al ecosistema y al medio ambiente (Raffino, 2020).

## 3. Otras soluciones

### 3.1. Túneles

El túnel es un tipo de infraestructura subterránea que conecta dos puntos externos que atraviesan superficies de diferente topografía. Este tipo de obra es esencial para permitir el desarrollo de las urbanizaciones, ya que sirve como un eje de comunicación entre diferentes comunidades. Estos túneles tienen como objetivo principal acortar la distancia, pasando por alto la topografía accidentada. Son utilizados principalmente en redes de metro y vías férreas, aunque en Guatemala esto casi no ocurre. En la actualidad se han desarrollado metodologías para evitar soterramientos y asegurar la construcción de los mismos, para brindar mayor seguridad a los usuarios.

Los túneles tienen un gran impacto en la congestión vehicular, debido a que al disminuir la distancia del viaje, si se logra una buena circulación, entonces el tráfico vehicular fluirá rápidamente.

Además, liberan la superficie para permitir otros usos a ese espacio disponible. Vale la pena mencionar que también existen túneles para peatones, ciclistas y para transportar agua (acueducto), telecomunicaciones o hasta para la protección de ciertas especies de animales (Spain, s.f.-b).

La principal desventaja de los túneles, radica en la incertidumbre de la posibilidad de riesgos que pueden ocurrir durante su construcción y durante su funcionamiento. Sin embargo, se pueden mitigar estas posibles consecuencias, los costos y plazos en los que se pueden ejecutar el proyecto. Además, este tipo de proyectos debe poseer una monitorización constante, tanto al momento de la construcción como durante su operación. De esta manera, existe una forma de prevenir accidentes, mediante mantenimiento predictivo y optimizando los costos de operación.

### 3.2. Metros subterráneos

El nombre real del “metro” o “subterráneo” como popularmente se conoce, a los sistemas ferroviarios que funcionan bajo tierra, de las grandes ciudades en diferentes países. He ahí el origen de decirle subterráneo. Es un medio de transporte masivo para personas, que comunica diferentes puntos, ciudades, regiones, etc. Al ser un sistema de transporte público, es una gran alternativa a la congestión vehicular que ocurre en las grandes ciudades, debido al exceso de automóviles. La principal diferencia con el sistema de transporte público por autobuses que ocurre en Guatemala, es que es una línea férrea que une dos o más puntos, por estaciones y rutas establecidas. Por lo tanto, las distancias siempre son las mismas y regularmente se cumple con la velocidad de viaje establecida, por lo que el tiempo de transporte de un punto a otro, es fácil de respetar. Esta red de transporte, al tener estaciones no sufre todas las necesidades del usuario, pero se conecta a otros medios de transporte que sí lo hacen. De esta manera, se genera una red de transporte público adaptado a las necesidades del usuario (Redacción, 2021).

Al momento de decidir la implementación de un subterráneo, se debe tener en cuenta que la infraestructura de la ciudad o región sea adecuada para la infraestructura. La mayoría de ciudades que implementan el metro subterráneo, son ciudades que tienen edificios, centros comerciales, estaciones, teatros y otras instalaciones con acceso subterráneo. De esta manera, las personas pueden acceder desde la red de transporte.

A nivel de infraestructura, se puede generalizar a los ferrocarriles que funcionan dentro de una “metrópolis”, reciben el nombre de “metro”. Este medio de transporte son generalmente eléctricos, que se desplazan sobre vías férreas, hechas de acero. Inicialmente los metros utilizan un conductor encargado de supervisar el funcionamiento correcto del metro, sin embargo, se han modernizado los sistemas, incluso al punto donde el ferrocarril es capaz de funcionar sin conductor, mediante el sistema de Operación Automática del Tren (ATO), que en ciudades como Copenhague, París y Londres ya se están implementando (Sensagent, 2013) .

Por último, se debe aclarar que este tipo de sistemas deben tener sistemas de control, para que su funcionamiento sea el óptimo, con el fin de garantizar la seguridad de los usuarios, la integridad de la infraestructura, evitar accidentes y regular la circulación del sistema de transporte en general. Dentro de los sistemas más comunes para la protección y control, se encuentran:

- Protección puntual: Control de la velocidad de desplazamiento del tren, para el control del tiempo de transporte, asegurar la seguridad y comodidad del usuario y respetar las señalizaciones que indiquen ciertos puntos.

- Protección continua: Es un sistema de comunicación que permite la obtención de información en tiempo real de las condiciones de la vía que se encuentra por delante del tren.
- Conducción automática: Es el sistema ATO descrito anteriormente, que mantiene velocidad constante y es capaz de acelerar o frenar cuando sea necesario, según indique el encargado de supervisar el sistema.
- Circulación sin conductor: Es un sistema moderno que permite la operación de diversas líneas de trenes, sin necesidad de un conductor, ya que todo se controla desde un centro de control.

(Sensagent, 2013)

### 3.3. Carreteras Elevadas

Este sistema de carretera elevada, es muy parecido al sistema de paso a desnivel, al menos en el principio general. La principal diferencia radica en que esta es una carretera completa en toda su extensión que se eleva sobre el nivel del suelo y que tiene un acceso controlado. Se puede generalizar como un puente en forma de viaducto: con pilares, columnas y vigas que sostienen una vía entera sobre sí, que suele ser larga y elevada para dejar el paso libre por debajo. Las razones por las cuales se pueden construir una de estas carreteras, son varias. Dentro de ellas se encuentran: cuando no se puede eliminar un cruce (intersección) entre diferentes vías, el tráfico es muy pesado para la infraestructura existente, y por último cuando se tienen obstáculos naturales que sea muy difícil eliminar para realizar una ampliación o cualquier otra posible solución como las alternativas anteriores.

Sin embargo, este tipo de carreteras tiene la principal desventaja de ser muy costoso, por lo que es una de las últimas alternativas a considerar. Dentro de las razones por las que se han construido históricamente, es debido a que antes se utilizaron ferrocarriles elevados, para liberar tráfico, evitar accidentes en las vías del mismo nivel y tener menor interrupción al momento de transportar a las personas. El sistema es utilizado en diferentes países con suficiente poder adquisitivo para construirlo, y con problemas de tráfico que finalmente encontraron una solución. Son ideales para ciudades y áreas urbanas con alto nivel de tráfico y poco espacio para expansión horizontal, por lo que se genera una expansión vertical (QAZ, 2021).

## E. SemafORIZACIÓN

### 1. ¿Qué es un semáforo?

Un semáforo es un aparato de control de tránsito que utiliza un sistema de fases de colores (rojo, verde y amarillo). Tiene como objetivo principal permitir el paso del tránsito, de manera ordenada y segura en el espacio disponible, en los diferentes sentidos que tome la intersección. Al utilizar semáforos se busca reducir los accidentes en intersecciones, las demoras al cruzar una intersección tanto de peatones como de vehículos, reducir el consumo de combustible por estar detenidos esperando a cruzar y por lo tanto, reducir los gases contaminantes producidos por los automóviles (Carrasco & Wazhima, 2012) . Los semáforos tienen diferentes componentes, los cuales son:

- Unidad óptica: Es el componente que genera la luz que normalmente se ve en los semáforos. Está conformada por un bombillo y el porta bombillas, puerta, lente y reflector. Tiene como objetivo principal, que la luz del semáforo se vea a cualquier hora del día sin importar la luz del sol.
- Cara: Es el componente que se encarga de regular los movimientos de la circulación para los vehículos que se desplazan en una dirección. Una cara del semáforo, se compone de un conjunto de unidades ópticas (una por color). Un semáforo puede tener varias caras.
- Lente: Es el componente a cargo de dirigir la luz del bombillo y el reflector, hacia la dirección de interés.

Existen factores que permiten el control de un semáforo, dentro los cuales se encuentran:

- Indicador de señal: Es una especie de interruptor que permite el encendido y apagado de las luces.
- Ciclo: Es el tiempo que toma el disco indicador para que de una vuelta; entiéndase, es una vuelta completa en todas las fases del semáforo.
- Movimiento: Conjunto de maniobras que tienen el derecho de paso simultáneo.
- Intervalo: División del ciclo (cualquiera) en la que no hay un cambio en lo que indica el semáforo.
- Fase: Segmento del ciclo con una combinación de uno o varios movimientos. Es la encargada de seleccionar y ordenar los movimientos permitidos o restrictivos que indica el semáforo. Solo puede indicar movimientos o combinaciones de movimientos que ocurran simultáneamente.
- Secuencia de fases: Es el orden por el cual las fases ocurrirán durante el ciclo.
- Reparto: Porcentaje de longitud del ciclo, que se asigna a cada fase.
- Intervalo de despeje: Es el tiempo que se le asigna a la fase naranja que sigue a la fase verde. Indica precaución al pasar.
- Intervalo todo rojo: Es el tiempo que se le asigna a la fase roja. Indica prohibido el paso. Permite el paso del otro sentido de circulación y también para los peatones.
- Intervalo de cambio de fase: Es el intervalo que puede ser únicamente el cambio naranja o si fuera necesario, un intervalo extra para el despeje del intervalo todo rojo.

## 2. ¿Cómo funciona un semáforo?

Dentro de los semáforos existe un controlador, el cual permite hacer los cambios y la programación de los ciclos, tiempos de fase, y en algunos casos, la sincronización de un sistema de semáforos. Aunque la composición del semáforo puede variar entre cada tipo, la composición básica y la forma en que funciona, son básicamente lo mismo (Dokko, 2013). Dentro de estas partes y cómo funcionan, se encuentran:

- Controlador autónomo de luces: Es el encargado de dar las directrices para la secuencia, duración y posición de los colores del semáforo. Se calibra según la hora oficial, para evitar cambios repentinos de las luces.
- Controlador satelital: Esta función es específica de los semáforos que incluyen la función para tener conexión a una red GPS, para saber la hora exacta con precisión de milisegundos, para activar el control del semáforo. Es el encargado de mantener informado al panel de control sobre el estado y monitoreo del semáforo.
- Central de control y monitoreo: Facilita el análisis del estado de los semáforos y en caso de algún problema, realiza las notificaciones pertinentes, para que se le de mantenimiento o se corrija el error.

### 3. Sincronización de semáforos

Existen semáforos que pueden ser prefijados que se encargan de regular la circulación del tráfico, mediante ciclos o intervalos de tiempo de cada una de sus fases, que deben estar definidas y estudiadas con anterioridad. Los intervalos de tiempo de cada semáforo se establecen en función de la demanda del tránsito de cada intersección. Según existan cambios en la planificación o necesidades de cada semáforo, se pueden cambiar características que pueden ser la duración del ciclo, los intervalos de tiempo, e incluso la secuencia de las fases y los desfases en cada uno.

Estos semáforos prefijados se utilizan cuando hay intersecciones con patrones de tránsito estables, o con variaciones que se pueden programar sin que se generen demoras innecesarias. Se adaptan a intersecciones donde se busque la coordinación de semáforos de toda una calle o avenida. Para realizar esta coordinación, hay que generar una programación (también llamada sincronización) de semáforos. Esto se puede generar e implementar si hay una correcta planificación respecto a las necesidades y limitaciones que tiene el punto analizado. Se debe tomar en cuenta que si hay ciclos muy largos, la población se presenta inconforme y no cumple con los ciclos establecidos. Es recomendable utilizar semáforos que permitan el control automático, debido a que los semáforos que se cambian manualmente no permiten una sincronía óptima, así que no se recomienda utilizarlos a menos que no exista otra opción (SIECA, 2000).

Para poder sincronizar los semáforos se necesita utilizar patrones de volúmenes diferentes en diferentes horarios en los que opera el dispositivo. Es ideal presentar una comparación respecto a conteos vehiculares que den un indicador sobre la regulación del tránsito en las diferentes vías. Para poder programar el tiempo de cada fase del semáforo, se utilizarán los siguientes parámetros:

- Carriles de circulación y limitantes físicas y geométricas.
- Variación de flujos de tránsito en cualquier dirección.
- Considerar cuales son las necesidades de los diferentes medios de transporte.
- Tiempo transcurrido entre el paso de dos vehículos consecutivos, al salir de la intersección.
- Considerar las necesidades de los peatones y si hay que desalojar la intersección para generar los cambios.
- Movimiento de cruce.

La sincronía de semáforos es algo sumamente complejo si se busca dar movilidad a un grupo de vehículos a lo largo de diferentes intersecciones.

Para poder llevar a cabo la sincronización, es necesario considerar ciclos que contemplan los tiempos verdes de los semáforos en cada dirección; estos tiempos se darán en función a la demanda que genere el tránsito analizado. En la sección de *¿Qué es un semáforo?* se habló sobre sus componentes y es importante recalcar que los semáforos tienen otras dos fases, la roja que sería la espera del semáforo equivalente a la fase verde del otro sentido de circulación de la intersección; por último, la fase naranja que son los 3 segundos de aviso previo a cambiar a fase roja.

La sincronización se genera a partir de software especializado (en la sección de “Software de simulación” se explica a detalle) el cual permita diseñar los ciclos y fases de un sistema semaforico completo. Sin embargo, la metodología que se utiliza como base para hacer esta sincronización, se describe a continuación. Es un método que se recomienda en el Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito, con el que se han obtenido resultados satisfactorios.

Como primer paso, se debe señalar si los espaciamientos de tiempo entre los vehículos que se encuentren en una intersección son iguales en las vías que se intersectan, a la hora de mayor tránsito. Un espaciamiento de tiempo entre vehículos, se define como el tiempo que hay desde que el semáforo se torna a su fase verde, hasta que el vehículo que está al frente del semáforo, empieza a moverse y sale de la intersección.

El segundo paso contempla dos posibles situaciones. La primera es que el tiempo de espaciamiento sea el mismo en ambas vías, entonces las fases verdes de cada calle o avenida, dependen proporcionalmente de los volúmenes de tránsito en los carriles con mayor congestión. La segunda situación es si, por el contrario, los espaciamientos presentan una diferencia significativa entre ambas vías, entonces las fases verdes serán proporcionales a los productos de los volúmenes de tránsito, por el espaciamiento medido en tiempo, de los carriles con mayor congestión.

Pese a ser un cálculo simple y básico, son valores aproximados al tiempo que le corresponde a cada vía. Sin embargo, este cálculo requiere de conteos vehiculares y de tiempos de espaciamiento. Si se busca generar esta estimación por cada intersección en zonas muy grandes, se requieren estudios muy grandes y con suficiente personal capacitado para llevarlo a cabo. Por lo tanto, análisis de este tipo, a gran escala, se realizan en software de simulación (SIECA, 2000).

Otras consideraciones que se deben tener en cuenta, independientemente de si es manual o por software, son las condiciones y limitaciones geométricas, además, de qué tanta amplitud permiten los semáforos dentro de su programación. Posteriormente se seleccionan los ciclos con la programación de tiempos, que deben ser revisadas y aprobadas.

Existen reglas generales para una buena sincronización. La primera es que ninguna fase verde será menor al tiempo que se toman los peatones en cruzar la calle; esto no puede obviarse, a menos que exista un semáforo específico para peatones y que el semáforo vehicular tenga esos tiempos de espera. Se recomienda que por lo menos, una fase verde sea de 15 segundos, para que los peatones puedan cruzar la calle o avenida, esto sin importar que los análisis indiquen un menor tiempo de fase verde.

Para llevar a cabo la coordinación o sincronización de semáforos (prefijados) se harán diferentes consideraciones. Primero, se debe considerar que los semáforos prefijados tendrán una separación de 800m (puede ser inferior) y deben controlar el mismo tránsito de una vía principal o una red de vías

alternas, de manera sincronizada entre sí. Existen casos en los que se permite una sincronización a distancias mayores, pero no es tan recomendable.

Los controles interconectados de un semáforo son ideales para llevar a cabo la sincronización. Sin embargo, para que se pueda llevar a cabo la coordinación, se pueden utilizar semáforos accionados y semáforos prefijados, tomando en cuenta la distancia apropiada entre cada uno de ellos. Hay que tener en cuenta que la sincronización no se puede realizar en todos los puntos, y habrán casos, como los semáforos que se encuentren en las fronteras del análisis, las cuales trabajarán con diferentes ciclos, y por lo tanto pueden no estar sincronizados.

Se debe tomar en cuenta que tener una operación independiente de los semáforos, puede generar inconvenientes y retrasos. Si se tiene una planificación de los semáforos, para que operen de manera sincronizada, y bien estudiada, entonces se pueden reducir y hasta eliminar dichos retrasos. Para la implementación de la sincronización existen diferentes tipos de metodologías a seguir, las cuales se ahondará a continuación (SIECA, 2000).

### 3.1. Sistema Simultáneo

Los sistemas simultáneos tienen la característica principal de que todos los semáforos que se encuentren a lo largo de la vía, dan la misma indicación aproximadamente al mismo tiempo. Pese a que es una sincronización limitada, es de gran importancia en la práctica. Generalmente, este tipo de sistema genera una sincronización igual para todas las intersecciones, cambiando simultáneamente; se busca que la luz verde esté indicando en el sentido de la vía principal, mientras la fase roja en la secundaria.

Este sistema permite la sincronización de hasta 5 intersecciones continuas entre sí. El tiempo de la fase verde, deberá ser lo suficientemente prolongado para que se pueda despejar una alta proporción de la circulación, en la intersección. Si la carga vehicular es alta, esta es una solución recomendable; por el contrario, si el flujo vehicular es bajo, entonces este sistema no es recomendable, porque incita a utilizar velocidades más altas en la fase verde, pero las continuas paradas reducen la velocidad media impidiendo un movimiento continuo. Normalmente los ciclos los controlan únicamente una o dos intersecciones, generando eficiencias muy bajas para las demás intersecciones (SIECA, 2000).

### 3.2. Sistema Alterno

Para este sistema se utilizan los semáforos adyacentes, o grupos de semáforos adyacentes. Estos semáforos indicarán fases opuestas, respecto al otro (u otros). Pueden ser sistemas dobles o triples, que simultáneamente presentan fases contrarias. El sistema tiene una alta aplicación en zonas donde las cuadras (o grupo de cuadras) son iguales en cuestión de longitud. Permite un control de la velocidad media de cada vía, a través de unas intersecciones que estén controladas de dicha manera, con los semáforos contrarios entre sí (SIECA, 2000).

### 3.3. Sistema progresivo limitado

Para este sistema, se debe fijar una duración común en los ciclos, pero las fases verdes se dan en función de la demanda de cada intersección. Los tiempos de fase verde también se determinan

conforme a un programa de tiempos que permita una circulación continua de un grupo de vehículos a una velocidad establecida.

Para llevar a cabo esta sincronización, es ideal tener una supervisión por controlador maestro, ya sea a través de una interconexión de cables, o bien, a través de señales de onda. Este control permite mantener los desfases controlados y apropiados para cada intersección.

Pueden utilizarse también controladores impulsados por motores sincrónicos operados por una fuente de alimentación común. La desventaja radica en que estos controladores dependen de la estabilidad de la energía, porque, si existen apagones, descensos del voltaje o hasta de temperatura, se puede perder la sincronía. Independientemente del tipo de controlador, es necesario inspeccionarlos constantemente para evitar cualquier perturbación al ciclo establecido (SIECA, 2000).

### 3.4. Sistema progresivo flexible

Este sistema utiliza características del sistema anterior, pero presenta otras características. Estas dependen del tipo de controlador, el control en sí y los accesorios del semáforo. Para este sistema, se utilizará un mismo ciclo, con duraciones de ciclo variables, dependiendo de la frecuencia que se necesite.

Los controles con carátulas simples permiten el uso de programas que dividen el ciclo y cambian las fases, dependiendo de la frecuencia. Los controles múltiples establecen programas predeterminados, priorizando las vías con mayor demanda al día o la semana, horas pico u horas de poco tránsito. Los motores sincrónicos con fuente de energía proporcionan diferentes ciclos con programaciones expansibles.

Para este sistema, se debe tener en cuenta la demanda de tránsito para seleccionar el tiempo y la coordinación. Si se busca una mayor flexibilidad, se deben realizar aforos vehiculares constantemente. Una consideración especial es que la velocidad de diseño debe tener relación con la que adquiere el tránsito si se eliminan paradas para pasos de peatones o de otras circulaciones transversales. Cuando se ha adaptado la velocidad al sistema entonces se busca aumentar la velocidad.

Si se aplica el sistema a una arteria urbana, se regula la velocidad entre 30 y 60 kilómetros por hora. Además, todo irá en función de las velocidades permitidas por el marco legal de la zona. Es el sistema para semáforos pre-fijados más efectivo, debido a que el movimiento continuo de grupos de vehículos es posible disminuyendo los tiempos de retraso por parada. Presenta un alto grado de eficiencia al adaptarse a los requerimientos de cada intersección. Además, permite un flujo con velocidades uniformes y se adapta a las diferencias de longitud de cada vía, en comparación a otros sistemas (SIECA, 2000).

### 3.5. Olas verdes

La ola verde es el nombre que recibe un fenómeno que se induce al tránsito vehicular a través de regulación vial. Dicha regulación es intencional y se lleva a cabo a través de una serie de semáforos. Los semáforos funcionan como reguladores para una o varias vías, para permitir el flujo constante en velocidad de los automóviles, que pasan sobre una intersección. Al fenómeno de ola verde, también se le puede llamar cascada. Consiste en que cualquier vehículo que se desplace sobre la vía que tiene

la ola verde, si lleva una velocidad constante, establecida previamente, entonces encontrará que los semáforos se colocan en la fase verde conforme va avanzando a través de la vía, sin detenerse en cada intersección.

La principal ventaja de la ola verde, es que permite mayores volúmenes de tráfico, reduciendo el ruido y la cantidad de combustible al evitar estar detenido con el motor encendido, como ocurre cuando el semáforo se encuentra en su fase roja. Sin embargo, es necesario considerar que las olas verdes solo permitirán el paso de un porcentaje de los vehículos, en función de la cantidad de tráfico que haya en la vía. Esto ocurre porque luego se tiene que dar paso a otras vías, por lo tanto, siempre existirá la fase roja de los semáforos, pero al iniciar nuevamente la ola verde, se podrá desplazar a lo largo de la vía, sin necesidad de frenar en cada intersección.

El ciclo del semáforo puede incluso ser programado a partir de sensores de tráfico. Esto ocurre si se tiene la tecnología suficiente para hacerlo; el sensor detecta la cantidad de tráfico y se inicia el ciclo de la ola verde. No está de más mencionar, que en Guatemala esa tecnología no está disponible. Las olas verdes no son perfectas, porque solo se utilizan en las vías más saturadas y con mayor tráfico; si se busca intercalar olas verdes en diferentes sentidos, se aumenta la complejidad de la sincronización, perdiendo efectividad como consecuencia principal.

La ola verde depende directamente del usuario y la velocidad a la que se desplaza, ya que si no se mueve dentro del rango de la velocidad indicada para tomar la ola verde, se enfrentará a la fase roja, cuando no debería. Esto trae como consecuencia, que los autos detrás de cualquiera que no cumpla la velocidad, se verán retrasados y no podrán tomar la ola, perdiendo el sentido de la sincronización (FMU, 2010).

Según el diario “Gestión” de Perú, se indica que las olas verdes pueden llegar a disminuir hasta un 30 % el tiempo de espera. Según Protránsito (departamento de tránsito de Perú) las olas verdes no deben ser de más de 300 segundos o su equivalente a minutos, cinco. Además, indica que esta es una de las principales razones por las cuales se debe invertir en nuevos semáforos, con tecnología suficiente para aceptar las sincronizaciones y adecuarse en función del tráfico (Gestión, 2019).

## **F. Análisis de tráfico**

### **1. Capacidad vial y niveles de servicio**

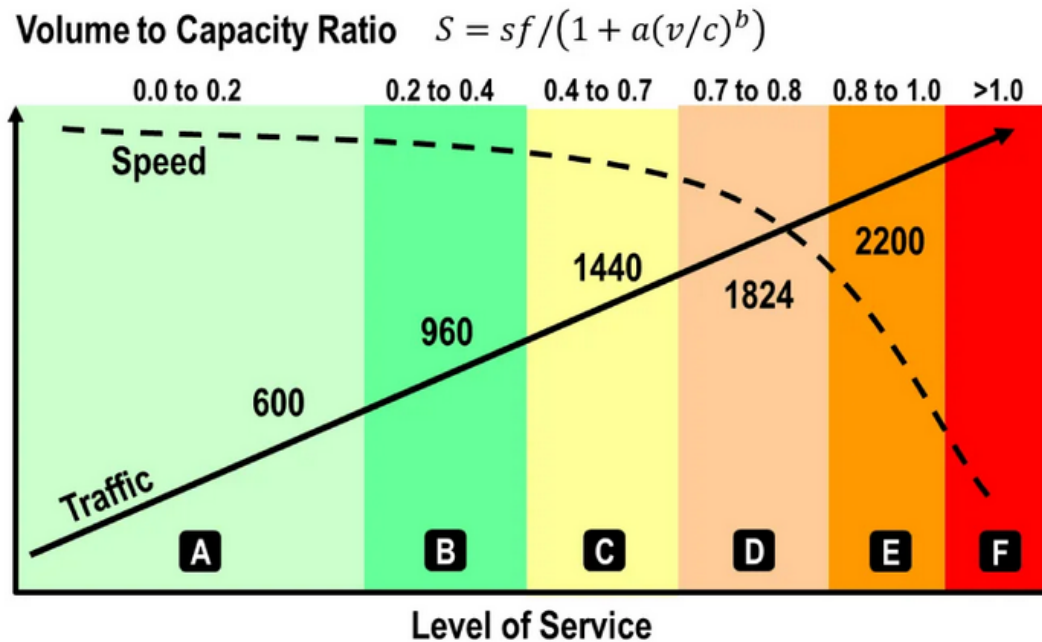
Al referirse a “capacidad de una sección de carretera” se hace alusión al número máximo de vehículos que tiene una probabilidad de cruzar la sección en cierto intervalo de tiempo definido. Esta varía en función de la geometría de la carretera, el estado en que se encuentra, el tráfico que circula por ella y qué medidas de control se tienen para el mismo. Para determinar la capacidad se deberá tomar en cuenta los límites de velocidad, el clima y si existe alguna prohibición de adelantamiento (Paredes et al., 2016).

El intervalo de tiempo que se toma como estándar en los análisis de capacidad, suele ser de 15 minutos. Esto es debido a que, según el Transportation Research Board, es el intervalo más corto en el que el flujo es estable. Además, es necesario aclarar que la capacidad es la tasa máxima horaria (Paredes et al., 2016).

Se suele conocer por sus siglas en inglés de Level of Service (LOS) , pero es una medida de la calidad que posee un tramo carretero con el usuario. Estos se ordenan alfabéticamente de la A hasta la F, teniendo un total de 6 niveles de servicio. Estos niveles determinar qué tan fluida o continua es la circulación en el tramo analizado. Con continuo se refiere a que no existen pausas o interrupciones en el flujo, debido a intersecciones o semáforos. Se obtiene la clasificación a partir de la velocidad promedio de los automóviles que se desplazan sobre la carretera y el volumen de tráfico que soporta (Paredes et al., 2016).

Para determinar el nivel de servicio se utiliza el HCM que por las siglas en inglés de Highway Capacity Manual. Este manual permite determinarlo a partir del rendimiento del tráfico, la velocidad, cuánto dura el recorrido, qué tan fácil es maniobrar en la carretera y también en función de la comodidad. Para el diseño de intersecciones se debe tomar en cuenta que por lo menos, se cumpla con el nivel de servicio “C” (Board, 2010).

Figura 1: Niveles de servicio en función del volumen y capacidad.



Nota. Adaptada de Rodriguez, (s.f.).

### 1.1. Nivel de Servicio A

El nivel de servicio “A” representa que la circulación que pasa por esta carretera tiene un flujo libre. Es el mejor nivel de servicio que se puede tener y permite que los vehículos puedan desplazarse libremente sin que la presencia de otros los afecte al circular. Las velocidades en las que se recorre y se manobra pueden ser determinadas libremente, en función de la comodidad con que se quiere que trabaje y qué tan conveniente es, para que la circulación sea fluida (Board, 2010).

### 1.2. Nivel de Servicio B

Este nivel permite la circulación mediante un flujo libre, sin embargo, se puede presenciar los efectos que tienen otros vehículos en la circulación de los demás. No se tiene tanta libertad de maniobra como en el A, pero aún se puede establecer la velocidad del viaje. Permite comodidad al momento de manejar en él, pero es inferior al nivel A. La presencia de otros vehículos, es notoria en el comportamiento de cada uno (Board, 2010).

### 1.3. Nivel de Servicio C

Se le conoce como flujo estable, dado que tiene diferentes complicaciones dado la carga vehicular y cómo afecta el tener diferentes usuarios en la misma vía. Se restringen la libertad de la maniobra y hay un evidente cambio en la comodidad, respecto a los niveles A y B (Board, 2010).

### 1.4. Nivel de Servicio D

Este nivel de servicio es el primero que posee una circulación bastante elevada, pero sigue siendo estable. Hay restricciones para la velocidad y para la libertad de la maniobra. La comodidad es baja, y cuando existen incrementos en el flujo vehicular, la vía comienza a tener problemas de colas pequeñas (Board, 2010).

### 1.5. Nivel de Servicio E

Presenta dificultades de funcionamiento, al ya estar cerca del límite de la capacidad de la vía. La velocidad de la vía es baja y uniforme; maniobrar dentro de estas vías es casi imposible y totalmente dependiente del usuario individual si se permite el cambio de carril. No hay tal concepto como comodidad en este nivel de servicio, generando inconformidad en los conductores. No hay ningún flujo constante y, al contrario, es inestable con variaciones de velocidades y de flujos vehiculares (Board, 2010).

### 1.6. Nivel de Servicio F

Recibe el nombre de condiciones de flujo forzado, debido a que existe una cantidad de tráfico tan grande, que se excede la cantidad para la cual está diseñada esa vía. Las colas se forman como principal indicador de este nivel de servicio; las colas son muy inestables, formando los llamados “cuellos de botella” (Board, 2010).

## 2. Ingeniería de tráfico

La ingeniería de tráfico tiene como objetivo adaptar los flujos de tráfico que se presentan en una vía, a la infraestructura existente de la red. De esta manera, se obtendrá un equilibrio entre los recursos disponibles y la demanda de tráfico existente. Esto se logra, evitando los cuellos de

botella en algunos puntos, y que en otros ni siquiera se utilicen. Para aclarar, un cuello de botella en ingeniería de tráfico se refiere al momento en que la capacidad de una vía no es capaz de soportar el flujo de tránsito al cual está siendo sometida, disminuyendo la velocidad del flujo y por lo tanto, generando tráfico. Entonces, la ingeniería de tráfico distribuye el tráfico para que la gran mayoría de las vías existentes, tengan una carga similar, para evitar acumulación en algunos puntos, que aumenten el tráfico (Research, 2020).

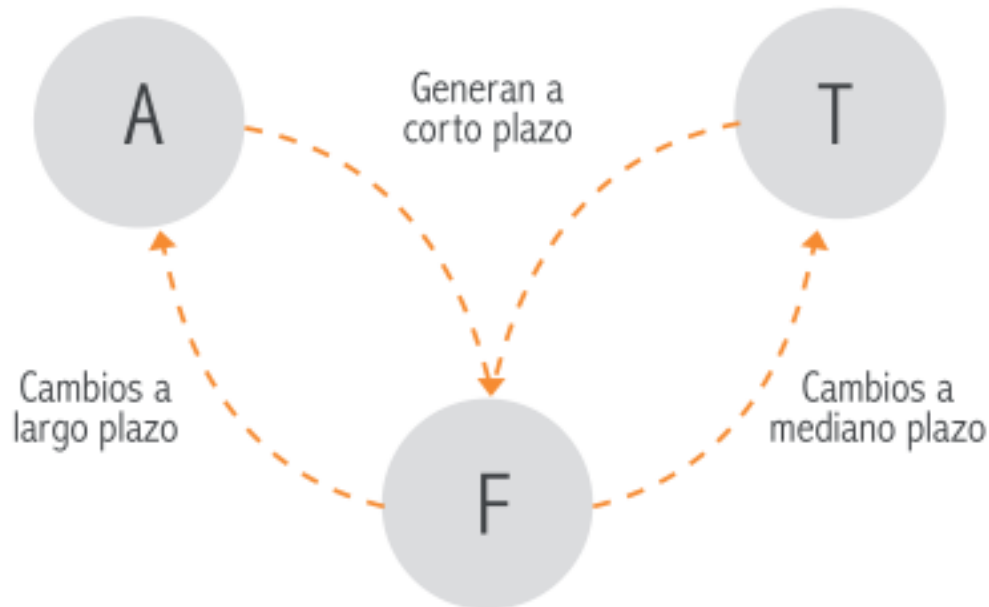
La ingeniería de tráfico es una rama de la ingeniería del transporte, que es una rama de la ingeniería civil. Dejando un poco de lado el tránsito en sí, a nivel global se busca una mejor planificación desde el diseño hasta la construcción, del transporte en las vías que constituyen la red de infraestructura. Además, al generar una mejor planificación y ejecución, se pueden tener mejores medios de transporte, para una movilidad óptima, segura y cómoda para el usuario, y también para la materia prima o diferentes objetos que se transporten por las vías (Research, 2020).

Es necesario conocer que el papel de la ingeniería de tráfico no es aumentar la infraestructura y construir más carreteras, etc. La ingeniería de tráfico, busca mejorar, evaluar y optimizar la infraestructura actual y si es necesario, se puede dimensionar y diseñar nueva infraestructura, pero como herramienta y no como fin. Se cuentan con diferentes elementos para optimizar el tráfico, ya sea mediante señalización, semáforos, sensores, etc. La evaluación de la infraestructura, consiste en saber cual es la calidad del servicio que brindan las carreteras. Además, es necesario generar las evaluaciones con cierta planificación hacia futuro, para tener idea de cual será el comportamiento próximo del tráfico para poder generar soluciones antes que exista el problema. De esta manera, se asegura un mejor servicio para el usuario (Spain, s.f.-a) .

Es una herramienta para ayudar a resolver los problemas que puedan impedir un flujo continuo o constante del tráfico en las vías. Además, para lograrlo se puede hacer una mejora en las intersecciones, en la geometría de la carretera existente y la demarcación y señalización de las vías. Las mejoras que se puede obtener de la ingeniería vial, es la optimización del espacio, mayor seguridad, reducción de accidentes, estudios del impacto del tráfico, mejora al transporte, optimización de intersección y los estudios de seguridad vial (Spain, s.f.-a) .

### 3. Teorías de tráfico

El problema principal para el tráfico, se puede observar desde diferentes puntos de vista. Y por dicha razón, dependiendo del autor, se pueden encontrar diferentes teorías y metodologías para su análisis. En esta sección, se explora las diferentes formas en que se puede analizar el tráfico, para comprender ya sea como analizarlo, o sus razones por las cuales ocurre. Previo a describir los diferentes tipos, es necesario saber que el tráfico se debe estudiar como un fenómeno física, que se puede estudiar cómo la dinámica del transporte. En esta dinámica, existe una interacción entre los sistemas de actividades y el sistema de transporte que tienen como consecuencia una necesidad de trasladarse, mediante patrones de viajes. Entonces, en función de la cantidad de viajes y tipos de patrones requeridos, habrá una necesidad de cambiar el sistema de transporte, su frecuencia y las formas en que las personas se transportan. Por último, cuando existe un aumento en la cantidad de personas que se mueven por cierto sector, se hace atractivo para más personas y surge un aumento en las actividades en ese punto, ya que otras personas generan nuevas actividades, como pueden ser centros comerciales, cines, restaurantes, residencias, etc (Fernández, 2010).

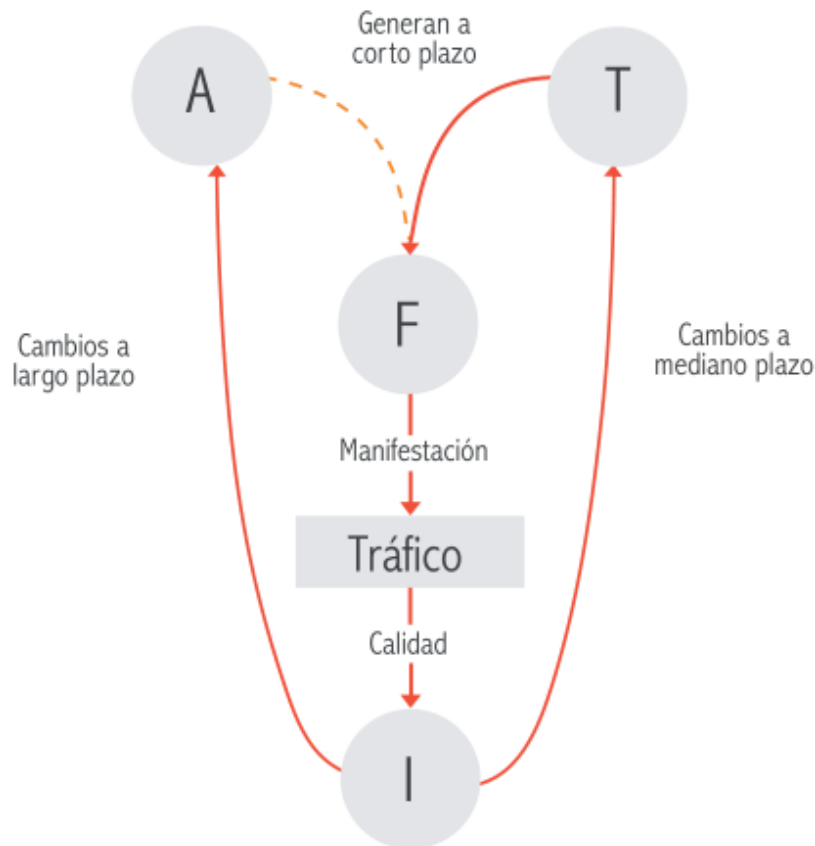
**Figura 2:** *Esquema de Manheim 1.*

**Nota.** Adaptada de *Fernández, (2008)*.

Lo antes mencionado es lo que se conoce como la dinámica del sistema de transporte. Para explicarlo gráficamente, se ha generado una figura llamada Esquema de Manheim. Dicho esquema es el que corresponde a la figura anterior, donde A son las actividades, T el sistema de transporte y F los patrones de viajes. Por último, como ya se mencionó anteriormente, al realizar cambios de los patrones de viajes en el transporte y las actividades, el esquema puede cambiar a la figura que se muestra a continuación. En ella se agregan dos nuevas variables, que son el tráfico y los derivados del tráfico (I), que afectan nuevamente al transporte y a las actividades. Los derivados del tráfico pueden ser la contaminación ambiental, auditiva y visual, además del riesgo, la congestión vehicular y los retrasos del viaje (Fernández, 2010).

### 3.1. Tráfico Inducido

Esta es una teoría de tráfico que indica que si el transporte público no es atractivo, ni incentivado, pero la ciudad sí es atractiva, entonces habrá un mayor incentivo al uso de un vehículo particular, generando tráfico innecesario e inducido. El tráfico inducido ocurre cuando una ciudad, región o metrópolis busca aumentar su capacidad vial, con el fin de motivar a más personas a visitarla; con eso no existe ningún problema. El verdadero problema ocurre cuando la planificación no fue bien hecha y no se fomenta el uso del transporte público. Al no ser atractivo y con una población con alternativas de uso accesibles, entonces se prefiere utilizar un vehículo individual y no colectivo, aumentando la cantidad de vehículos en circulación (City, 2020) .

**Figura 3:** *Esquema de Manheim 2.*

**Nota.** Adaptada de *Fernández, (2008)*.

El primer paso para evitar la inducción del tráfico, es generar una mejora al transporte público. Este debe presentar calidad, comodidad, seguridad, higiene y que sea económicamente accesible para la población. Además, el sistema de transporte público debe tener diferentes rutas interconectadas, para asegurar que la población tenga acceso a sus diferentes rutas, a lo largo de su recorrido.

El segundo punto, es el control del tránsito vehicular. Para ello se deben colocar señalizaciones y demás infraestructura que favorezca al peatón; estos pueden ser señalizaciones de reducción de velocidad, alto, pasos de cebra, entre otros. Si esto se logra, el tránsito vehicular utiliza una velocidad menor, aumentando la seguridad del peatón, disminuyendo el riesgo por accidentes de exceso de velocidad, y generando velocidades de flujo de tráfico más fáciles de controlar. Pese a que pareciera que disminuir la velocidad de un flujo de tráfico fuese perjudicial para el tráfico (entiéndase, lo aumenta) es lo contrario. Si no existen accidentes por impactos de vehículos, o con peatones, entonces no habrá obstaculizaciones. Además, no todos los vehículos viajan al mismo ritmo, principalmente si esto ocurre en altas velocidades. Por lo tanto, regular la velocidad del tránsito, aunque sea baja, es mejor (City, 2020) .

¿Qué pasa si la señalización y la infraestructura favorece a los vehículos? Entonces se induce el tráfico. El hecho de tener vías más libres, rápidas, con mayor espacio, etc. las hacen más atractivas para las personas, generando más afluencia vehicular en ese punto. He aquí el problema del tráfico

inducido; generar soluciones muy atractivas, desincentiva el uso de transporte público y fomenta el uso de vehículos individuales. Por lo tanto, la solución sí resuelve el tráfico, pero únicamente por un momento, ya que con el pasar del tiempo se generó más tráfico del que había (City, 2020) .

#### 4. Gestión de tráfico

Este es un tema que normalmente se aplica a las industrias, al momento de gestionar cómo se realizará la gestión y logística del transporte, antes, durante y después de las entregas y la selección de rutas de distribución. Sin embargo, este papel se puede profundizar y asignar también al análisis de tráfico vehicular a una escala macro, que pueden ser a nivel de ciudades, regiones etc. Entonces, las principales razones para utilizar este tipo de gestiones, es que se debe realizar un análisis de los tipos de vehículos que circulan en el sitio de interés. Por lo tanto, al realizar este tipo de análisis, se puede tener claro cual es el tipo de vehículos que circulan por el área estudiada.

Como segundo punto importante en la gestión de tráfico, se tiene que existan programas de capacitación y formación de los conductores. En este caso, aplicado a una escala macro, se debe velar principalmente porque las personas que conducen automóviles, conozcan las normas para manejar en la zona. Si por ejemplo, existen horarios especiales de circulación para diferentes carriles, entonces se debe realizar una señalización correcta y clara para que todas las personas estén enteradas. Por último, otro punto importante es la optimización del tráfico y la logística del transporte. En este caso, se debe realizar un mejor diseño para una mejor circulación y distribución del tráfico (Beetrack, s.f.) .

Para que el transporte a nivel regional sea el adecuado, se debe tener en cuenta que este no se utiliza únicamente para el transporte de personas individuales, sino también para el transporte de mercancías. Por lo tanto, generar rutas específicas para transportes pesados y con mercancías, es lo ideal, para obtener una mejor distribución del tráfico. De esta manera, también las empresas a cargo del transporte de mercancías, puede asegurar una mayor rapidez y seguridad debido a que las carreteras como tal, lo permiten.

#### 5. Planificación urbana

La planificación urbana es la encargada de globalizar la historia, formación, transformación y consolidación de todo el urbanismo dentro de una ciudad o región. Además, debe tomar en cuenta las diferencias que existen entre los diversos grupos, tales como estatus social, variedad cultural, etc. La planificación urbana, permite la organización y evolución de una ciudad, tomando en cuenta los aspectos legales y económicos del sector. Además, durante la fase de expansión y crecimiento, se debe dar una guía de como transformar la ciudad, de una manera que sea viable económicamente, que sea sostenible y que sea capaz de asegurar la equidad para los habitantes.

Aunque la planificación tuvo sus orígenes cerca del siglo XIX, tomó una gran importancia cuando se generaron las revoluciones industriales y urbanas. Debido a esto, la sociedad tuvo que evolucionar y la infraestructura comenzó un gran crecimiento. Sin embargo, la planificación urbana no proyectó los grandes crecimientos económicos y poblacionales, por lo que actualmente es uno de los principales problemas de la urbanización global (Pura, s.f.) .

El principal objetivo de la disciplina es garantizar la calidad de vida de los habitantes, sin descui-

dar la armonía con la que se desarrollan las diferentes actividades dentro de la ciudad. Últimamente un factor que es de gran importancia en la planificación urbana, es el hecho de que se pueda tener un desarrollo sostenible. Este consiste en tomar en cuenta las necesidades de los habitantes y de los diversos sectores, pero también considerando cuales son las características naturales y tratar de respetarlas lo más posible.

Para llevar a cabo una buena planificación, se utiliza una herramienta llamada “Plan Director” el cual tiene como objetivo, mejorar el aspecto de las ciudades, respetando la calidad de vida de los habitantes. El Plan, consiste en un diagnóstico basado en los aspectos reales de la ciudad, que presenta propuestas para un futuro que permita el desarrollo socio-económico y una mejora en la organización del territorio (Pura, s.f.). Los principales enfoques de una planificación urbana son:

- Uso del suelo.
- Recreación.
- Turismo.
- Desarrollo cultural.
- Medio ambiente (Desarrollo sostenible).
- Calidad de vida.
- Patrimonio cultural.
- Recursos naturales.
- Recursos energéticos.
- Transporte.

Debido al alto crecimiento poblacional y al desarrollo urbano de las diversas ciudades, la planificación urbana es uno de los factores más importantes hoy en día. De esta manera, se busca ordenar el crecimiento y asegurar la sustentabilidad y la armonía de los habitantes.

### 5.1. Dirección de Planificación Urbana

En el caso de Guatemala, específicamente la municipalidad de Guatemala, tiene un departamento específico para la planificación urbana. La encargada de ello, es la dirección de planificación urbana DPU. Surge en 2008 tras la aprobación del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Guatemala. La dirección tiene como objetivo promover las normativas de la gestión del suelo para su uso adecuado y eficiente. Busca que la ciudad se desarrolle de una manera densa y compacta, que facilite el desarrollo de la vivienda, comercio y zonas de producción. De esta manera, es posible asegurar un desarrollo sostenible para los habitantes. La DTU tiene tres principales funciones, las cuales son la planificación normativa, que busca que se cumplan las normas establecidas y generar diferentes normativas, a través de opiniones técnicas y diversas especificaciones. La segunda función es la planificación estratégica territorial, que se encarga de formular planes Directores, Zonales, Maestros y proyectos urbanísticos. Por último, se encarga de la planificación estratégica municipal, que se encarga de generar y realizar los proyectos urbanos en la ciudad y área metropolitana (de Guatemala, 2008).

## G. Valores estadísticos

Esta sección se menciona debido a que es necesario tener conocimiento básico de estadística, para realizar los análisis que se llevarán a cabo durante este trabajo de graduación. Los conceptos a explorar son la media, mediana y moda, que son los principales valores estadísticos para identificar tendencias en el comportamiento de los datos analizados. Posteriormente se explicará el diagrama de caja y bigote para mostrar gráficamente los valores previamente mencionados. Por último se tratará el tema de estandarización, la exactitud y precisión al momento de obtener datos.

### 1. Media, mediana y moda

#### 1.1. Media

También recibe el nombre de media aritmética o promedio. Con ella se refiere al valor promedio de un conjunto de datos numéricos. El cálculo del valor es simple, y corresponde a la sumatoria del conjunto de valores dividida dentro de la cantidad total de valores. Recibe el nombre de término matemático, pero es sumamente importante en los términos estadísticos, ya que le da origen a muchos más términos. Para la media aritmética, todos los valores tienen la misma ponderación, por lo que la ecuación que la describe es:

$$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Nota:  $x$  corresponde al valor de una observación,  $i$  es una observación y  $N$  el número total de observaciones (López, 2018).

#### 1.2. Mediana

La mediana es un término estadístico que divide una distribución de un conjunto de datos en dos. De esta manera, se puede obtener la misma cantidad de valores de ambos lados. Los valores obtenidos deben tener un orden, ya sea ascendente o descendente, para que la mediana puedan calcularse. La mediana es un valor que permite conocer la forma de una distribución. Para su cálculo, es necesario utilizar una fórmula que indica cuál es la posición dentro del conjunto de datos y no el valor en sí. Sin embargo, si la cantidad de valores “ $n$ ” es par entonces, la mediana será la media de los valores de las dos posiciones enteras; en el caso de que “ $n$ ” sea impar, esa será la posición del valor de la mediana (López & Sanjuán, 2019). La ecuación es la siguiente:

$$x_{\frac{N+1}{2}}$$

#### 1.3. Moda

La moda también es un valor estadístico que tiene como principal función identificar cuál es el valor que más se repite en una muestra o población. No tiene ninguna fórmula que permita

encontrar el valor como tal, por lo que únicamente habría que realizar una búsqueda de cuál es el valor que presenta una mayor frecuencia en el conjunto de datos obtenidos. Tiene una ventaja bastante interesante: se utiliza incluso con valores cualitativos, lo que no pasa con la media y mediana que solo se utilizan con valores numéricos. (López, 2019)

## 2. Precisión y exactitud

### 2.1. Precisión

“La precisión es lograr la mínima dispersión al momento de hacer una medición o de realizar una tarea”(Westreicher, 2020) . Por lo tanto, la precisión es que de todo un conjunto de mediciones realizadas, los valores obtenidos presenten un valor similar. Si hay poca diferencia entre los resultados, entonces, son precisos. Depende de variables como el instrumento con el cual se realiza la medición, el operario y las condiciones en las que se realiza la medición. Se puede generalizar que la precisión tiene mayor relación con la repetición de varios resultados similares.

### 2.2. Exactitud

Un valor es exacto, cuando el valor obtenido en una medición es igual al valor real. Para ello hay que tener en cuenta que si se realiza una medición para saber cuál es la exactitud, se debe tener un parámetro de referencia que funja como el valor real, con el cual se realizará la comparación. Se puede generalizar que la exactitud tiene mayor relación con comprobar que una medición sea correcta respecto a los valores que realmente deben ser (Westreicher, 2020).

## H. Software de simulación

### 1. SIMIO

El software SIMIO es utilizado para diferentes simulaciones que requieran de un modelado en 3D o 2D. En él se pueden plantear diferentes escenarios que pueden ir desde flujos de procesos simples y discretos, hasta un enfoque mixto. Combinando procesos complejos y diferentes elementos se puede modelar de la manera más realista posible, el comportamiento de cualquier situación. Tiene una importante limitante, y es que únicamente se puede utilizar con un operador con Windows

El modelado puede ser bastante preciso, dependiendo de la dedicación con la cual se realice. Permite la obtención de datos representativos de una situación real, y la predicción de escenarios imaginarios. Los resultados obtenidos mediante la situación son de gran utilidad al utilizarlo para la planificación de situaciones a corto, mediano y largo plazo. Tiene la ventaja de presentar animaciones en 3D, lo cual es bastante atractivo al presentar propuestas.

SIMIO utiliza objetos simples que pueden ser programados al gusto y necesidad del usuario, con el fin de ser más “flexible”. Además, presenta instrucciones que se pueden transferir a los objetos de diferente forma, permitiendo una infinidad de posibilidades con las cuales modificar el comportamiento del sistema. Se ha utilizado efectivamente en sistemas con flujos de materiales, personas e

información. Sistemas tales como aeropuertos, zonas portuarias, almacenes y cadenas de producción son comúnmente modelados en este software. Además, se debe tomar en cuenta que el software permite una aproximación a un modelado en 3D y 2D, lo que permite observar los objetos de manera sencilla para ser analizados y también atractivas al momento de presentarlo ante diferentes clientes (SIMIO, 2019).

Por las razones previamente mencionadas, el software SIMIO es ideal para el modelado del tráfico. La razón, es que puede ser analizado como un flujo y de esta manera obtener los valores bajo diferentes situaciones. Además, presenta la opción de asignar diferentes comportamientos a las diferentes entidades que circulan en el flujo, lo cual, es de gran utilidad al contemplar que el comportamiento humano no es totalmente predecible, más sí presenta ciertos patrones.

## 2. Synchro Studio

Synchro es un software que permite el modelado, optimización, gestión y simulación de sistemas de tráfico. Mediante este software de simulación se pueden generar análisis macroscópicos del comportamiento del tráfico y también se puede generar una optimización del mismo. Permite la modelación de la infraestructura de manera tridimensional lo cual permite la observación del comportamiento del tráfico de manera más amigable, no solo para los usuarios del software, sino también para cualquier persona que pueda ver los resultados finales a través de una simulación que represente virtualmente lo que físicamente ocurre (Studios, 2003).

Dentro de las principales características de Synchro se encuentra el análisis de capacidad, el cual se hace mediante la evaluación de las intersecciones y permite determinar cuál es la capacidad de la intersección analizada. Para llevar a cabo dicho análisis, es necesario conocer el volumen actual de las intersecciones. Además, permite tanto el análisis individual de la intersección, como una red de estas. Además, se puede generar una optimización del tiempo en cada una de ellas. El software es capaz de realizar los cálculos, tomando en cuenta otros factores adicionales, como el retardo que genera una cola. Esta es una de sus principales ventajas en comparación a otros software, ya que lo hace más realista (Studios, 2003).

La siguiente función importante de Synchro, es la de coordinar y optimizar. En ella se pueden generar planes óptimos de tiempo, para la semaforización. Esto incluye los ciclos, compensaciones y la secuencia de fase, con el fin de minimizar los retrasos y paradas innecesarias. Presenta la ventaja de que si se realiza el modelo y una vez están ingresados los datos, se pueden realizar cambios en los datos de entrada y el modelo es capaz de actualizarse automáticamente y generar de nuevo la optimización con nuevos datos. Además, genera los diagramas de tiempo para apreciar cuales son los planes de temporización recomendados por el software. Está claro que la decisión final debe tomarse en función del criterio del encargado del proyecto, pero es una gran herramienta que genera directamente la información necesaria para una toma de decisiones (Studios, 2003).

El software es capaz también de generar señales de accionamiento ya sea para retrasar o acelerar el comportamiento en diferentes puntos. También permite el modelado de rotondas para el análisis de los efectos que genera en el modelo. Por último, genera los diagramas de tiempo-espacio, mediante diferentes colores indica cuales son los fraccionamientos y compensaciones que se pueden cambiar en el diagrama. Se pueden obtener los diagramas para identificar el tráfico que puede viajar por una vía sin detenerse; otro diagrama permite la demostración de vehículos que se detienen, esperan y luego se retiran. Cada uno brinda información para evaluar la mejor opción (Studios, 2003).

Aunque ya se mencionó al principio sobre este software, es necesario indicar que es capaz de generar simulaciones en 3D, que puede ser fácilmente apreciado por las diferentes personas. En él, se pueden simular los vehículos, ya sean automóviles, camiones, autobuses, etc. Además, se pueden modelar los peatones como tal, e indicar las semaforizaciones en las diferentes intersecciones. El visualizador 3D permite también aplicar diferentes fondos predeterminados para una mayor apreciación (Studios, 2003).

### 3. InfraWorks

Previo a hablar de cuáles son los beneficios y principales características de InfraWorks respecto a otros software, es necesario saber que el software no es específico de tráfico. Este es un software que permite el diseño conceptual de diferentes obras civiles, desde la modelación, análisis y visualización. Además, toma en cuenta el entorno en el cual se llevarán a cabo las obras, de esta manera logra brindar una mejor experiencia para quien utiliza el software, y facilitando la toma de decisiones y mejorando los resultados esperados del proyecto (Autodesk, s.f.) .

Además, InfraWorks es un software capaz de generar modelos que están contextualizados al mundo real. Esto lo logra mediante cantidades grandes de datos disponibles en los servidores de Autodesk, que son obtenidos mediante satélites para una mayor precisión. Por lo tanto, los modelos generados son realmente grandes y con mucha información. Esto permite una optimización del modelo y que puede ser vinculado mediante información GIS generando georeferencias. He aquí uno de los principales factores del software, porque es capaz de generar modelos bastante acertados a la realidad, con información precisa. Se pueden cargar las condiciones del entorno, tales como topografía, edificios, construcciones y demás accidentes naturales que enriquezcan el modelo y lo apeguen lo más posible a la realidad (Autodesk, s.f.) .

El modelo puede ser optimizado para tener un mejor diseño, mediante visualizaciones realistas. Se permite el análisis y simulación mediante herramientas que contiene el mismo software y de esta manera tener datos más realistas. Por último, es capaz de generar visualizaciones y material audiovisual para una mayor representación de los resultados obtenidos, listos para ser presentados a los clientes. No está de más mencionar que al ser un software de la familia de Autodesk, es compatible con los diferentes software del mismo fabricante (Autodesk, s.f.) .

Respecto a la simulación de tráfico, es una de las herramientas que contiene el software. Con dicha herramienta se pueden generar análisis de flujo de tráfico, evaluando las intersecciones. Los resultados obtenidos son codificados mediante colores para una fácil interpretación. Dentro de los resultados, también se encuentran las animaciones de la simulación y que se pueden obtener tomas específicas del modelo realizado. Su ventaja principal radica en que se pueden evaluar diferentes perfiles y tipos de vehículos y conductores, además de otras variables. Si realmente no se busca un análisis tan profundo, se pueden utilizar demandas predeterminadas, solo para una pequeña demostración de cómo funciona el software y su aplicación en la parte de tráfico (Autodesk, 2016).

## A. Medición

La medición se refiere a la conceptualización de diferentes elementos en forma de magnitudes, patrones, unidades, etc. Para ello se deben definir los parámetros a utilizar para estudiar el fenómeno. Se define a la medición como “la comparación entre un patrón seleccionado, con el fenómeno deseado para medir” (Barrientos, 2019). En el caso de esta investigación se definirá cual es la metodología por seguir para la “medición” del tráfico.

### 1. Recolección de datos

- Se utilizarán datos de la Municipalidad de Guatemala sobre los tiempos de fase de la semaforización en algunas intersecciones del Centro Histórico de la Ciudad de Guatemala. Estos pueden ser apreciados en los anexos refiriéndose a la figura 42.

La composición de los datos se espera que sea de la siguiente forma:

- Que contenga la distribución de los tiempos y ciclos de semaforización
- La fase verde del semáforo por intersección, indicando su tiempo total y efectivo.
- La fase roja del semáforo por intersección, indicado su tiempo total y efectivo.
- La fase naranja con la duración correspondiente (generalmente de 3 segundos) y la posición que ocupa dentro del ciclo.
- Dependiendo de la configuración actual de los semáforos, se podrá determinar los diferentes ciclos que se manejan en los semáforos, dependiendo de la hora del día y si hay algún cambio según las diferentes actividades que ocurren al año, por ejemplo, en días festivos.
- Distribución de los tiempos con relación a otras intersecciones para determinar si actualmente existe o no una sincronización y de qué tipo.

## 2. Verificación de datos

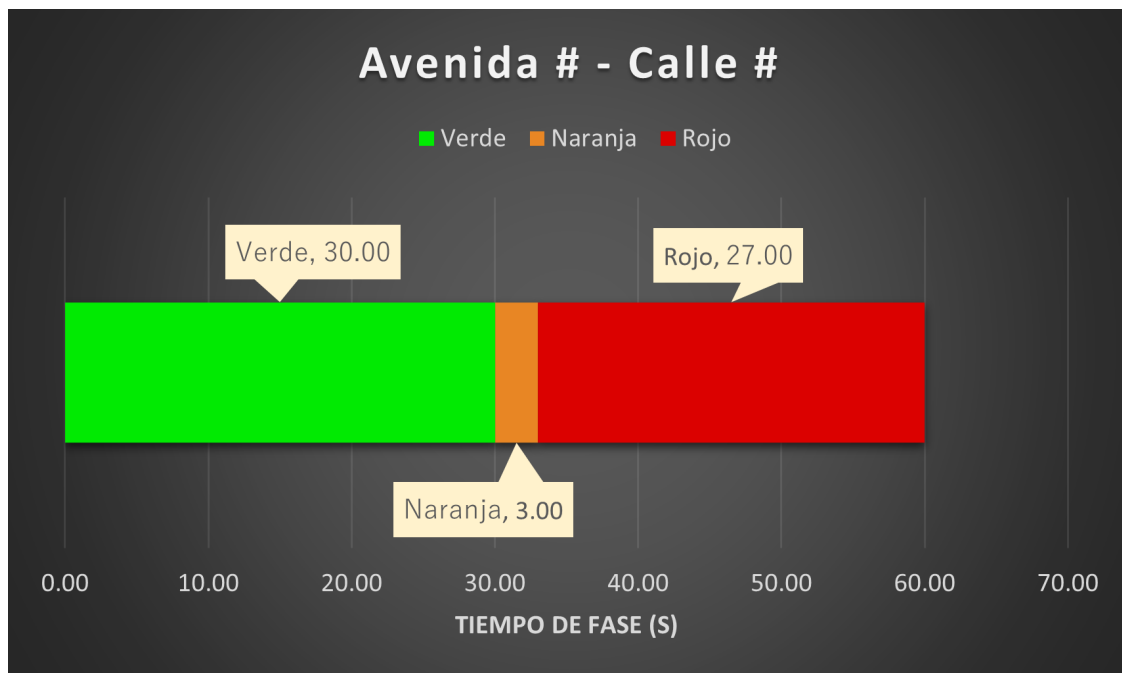
- Para tener una primera validación de los datos, se comparará la información recibida, con la configuración real de las vías de tránsito actuales según el horario seleccionado para el análisis.

## 3. Interpretación de datos

- Identificación de puntos críticos, el comportamiento de la semaforización en diferentes horas y, si existen o no, patrones según el día y la hora.
- Estudio estadístico de los valores obtenidos, tales como valores mínimos y máximos, atípicos, media y tipo de comportamiento.

Para facilitar el entendimiento de un semáforo, se genera la siguiente figura en la cual se presenta visualmente cuál es la distribución del ciclo del semáforo, en sus diferentes fases. La hoja de cálculo utilizada está automatizada de tal forma que se cambien los colores en función de cada semáforo y de la configuración del ciclo.

**Figura 4:** *Tiempo de fase del semáforo de la intersección indicada.*



**Nota.** Elaboración propia, (2021).

Generalmente los ciclos de los semáforos consisten en 3 fases: Verde, naranja y rojo. La fase verde permite el desplazamiento de los vehículos en la vía cuando el color se hace presente en el semáforo. En el caso de naranja o ámbar, es una fase de transición entre verde y rojo que indica estar alerta para detenerse. Por último, la fase roja que es la que impide el paso cuando el color está presente en el semáforo.

Los ciclos semafóricos pueden variar conforme el día. Esto se debe a que existen diferentes horas en las cuales el comportamiento del tráfico es variable, en función del tráfico al que se enfrentan las calles y avenidas dependiendo de la hora. Por ejemplo, la avenida Elena en el Centro Histórico, se enfrenta a diferentes flujos vehiculares en la mañana, y en la tarde, debido a la dirección que toman los flujos.

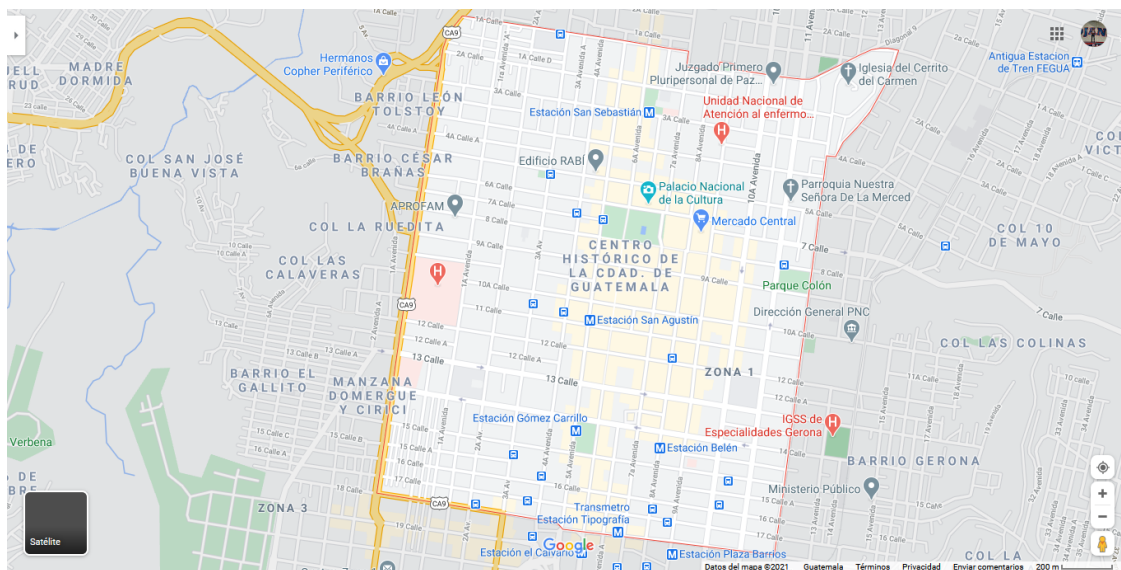
## B. Simulación

### 1. Modelado en software

- Modelar en el software seleccionado el mallado del Centro Histórico con los datos clasificados y ordenados.
- Modelar en el software los puntos críticos, utilizando como base principal para el modelado los datos obtenidos de la sección de medición.

Se genera como punto de partida el modelo preliminar del Centro Histórico tomando como referencia la distribución que se indica según el acuerdo Ministerial 328-98 del Ministerio de Cultura y Deportes. En él se especifica que el Centro Histórico está delimitado por la intersección entre la 18 Calle y 12 Avenida de la zona 1 de Guatemala. Se sigue sobre la 12 Avenida hasta la 4 Calle, para rodear el cerrito del Carmen con intersección con la Diagonal 9, siguiendo sobre la 1A Calle hasta la Avenida Elena. Por último, se sigue el recorrido sobre la Avenida Elena hasta llegar a la 18 calle nuevamente. Para un entendimiento más sencillo, se recomienda ver la imagen a continuación, extraída de Google Maps. Ver figura 5

**Figura 5:** Delimitación del Centro Histórico(zona 1).



**Nota.** Fuente: *Google Maps*.

### 1.1. Modelo en SIMIO

El modelo realizado para SIMIO fue mucho más sencillo, ya que no se representa en sí toda la malla o retícula del Centro Histórico, pero es más específico respecto a la intersección. La figura 35 muestra la disposición de los elementos necesarios para su análisis. Primero se definen las entidades que son los vehículos que circularán por los “paths” o rutas que se definan. Se encuentran las fuentes identificadas como calles o avenidas, que son los que permiten el desplazamiento de las entidades. Por último, se encuentra la salida que es la forma de indicar que el camino ha terminado y gracias a él se pueden saber cuantas unidades pudieron recorrer la ruta indicada con éxito. La intersección se modela mediante un nodo especial, al cual se le estará asignando el papel de semáforo.

Posteriormente, se procede a hacer una interfaz más amigable y entendible, como se puede apreciar en la figura 36. Se procede a examinar el recorrido y la frecuencia con la que se hará. Para ello, es necesario hacer las modificaciones pertinentes en la figura 37, donde se ingresarán los datos proveídos como valores de entrada.

El siguiente paso, es darle a cada entidad un patrón a seguir o una ruta, ver figura 38. Esto generalmente representa el comportamiento humano, por lo que más adelante se deberá agregar un factor de aleatoriedad con el finde hacerlo lo más representativo posible. Cómo se mencionó anteriormente, una vez se “destruyen” las unidades, se puede saber cual es el valor obtenido tras la simulación, esto es apreciable en la figura 39

Por último, con el fin de mostrar una intersección más formal y que esté limitada por la capacidad de la carretera, las velocidades de desplazamiento y el semáforo que dicta el ritmo del flujo vehicular, se puede apreciar la intersección modelada, en la figura 40. Para finalizar, el modelo contiene también un diseño bastante simple pero aproximado referente a las entidades que maneja, ver figura 41

Inicialmente se utilizó un modelo de simulación bajo el software comercial SIMIO, el cual está descrito en el apartado de anexos, sin embargo, durante la ejecución del modelo, fue posible determinar que el software no fue adecuado para la metodología propuesta. Este modelo puede ser apreciado en la sección de anexos en de la figura 35 a la figura 41.

Por lo tanto, se utilizó el software de simulación Infracore con la herramienta del simulador de tráfico con el cual la metodología propuesta fue mejor acuñada a las necesidades.

### 1.2. Modelo en Infracore

El primer paso en la simulación fue la construcción del modelo, tomando como base principal la delimitación del Centro Histórico mencionada anteriormente. Este paso se puede apreciar en las Figura 11 y Figura 12, donde se muestra paso a paso como se carga el área de estudio al modelo. Como siguiente punto se puede apreciar en la Figura 13, cómo queda el modelo del Centro Histórico cargado al Software. Para elaborar el modelo, es necesario seguir cierta secuencia lógica para la simulación completa y adecuada del modelo. Por el momento, la descripción a manera de texto explicativo es la siguiente:

Los siguientes pasos son claves para la correcta modelación y simulación. En la figura 14 se muestra una calle la cual debe ser corroborada que coincida con el sitio a analizar. Este paso generalmente se hace automáticamente por el software, pero siempre es necesario corroborar la

información. Se debe conocer según la ubicación de la calle en otros software como Google Maps, con un poco de mayor precisión. Una vez revisadas todas las calles, se puede proceder al análisis de tráfico. En este caso, fue la 3era avenida. Una vez se ha cargado el modelo, se debe corroborar que las calles estén correctamente identificadas por el programa para luego abrir el simulador de tráfico, como una de las herramientas internas del programa.

Tras haber abierto el simulador de tráfico debe identificarse intersección por intersección para caracterizarlas. Con esto en mente, se deben ir asignando las propiedades, dependiendo del giro, la dirección, el sentido, las posibles combinaciones de cruce por intersección y finalmente asignar el tipo de semaforización y señalizaciones que existen en cada una de las partes de la calle. En la figura 17, se aprecia una caracterización típica de las calles, estas generalmente son de dos carriles y se pueden ir modificando individualmente. El software permite simular la geometría, velocidad máxima, cantidad y capacidad máxima, etc. En este caso, con tener la orientación de los flujos es suficiente ya que no se está haciendo un análisis más profundo, debido a la falta de datos.

En la figura 18, se aprecia una caracterización típica de la intersección. La intersección es el punto con mayor valor para esta tesis, debido a que en ella se puede gestionar el tipo de vehículos que circulan, el tipo y forma de la intersección, así como la redistribución que se puede tener en el flujo vehicular, dependiendo de la dirección y sentido. Lo mencionado anteriormente se puede apreciar en las figuras de la 19 a la 21. Por último, una intersección modificada muestra la señalización de la dirección del flujo vehicular en sus calles 22.

El siguiente paso, es la simulación del tráfico. Una vez establecido el modelo, y configuradas las propiedades de las calles e intersecciones, se puede delimitar una intersección individualmente (también se puede hacer con varias a la vez, pero es demasiado pesado el modelo) para su análisis. En la Figura 26, se aprecia cómo se distribuye el tráfico en la intersección analizada. Por último, en la figura 27, se puede observar como se modifican los semáforos con el fin de dar una mejor orientación al flujo vehicular. Este es el factor principal y que puede tener mayor beneficio para el desarrollo del presente trabajo de graduación.

Una vez ubicado dentro del simulador de tráfico de Infracore, se procede a abrir la aplicación de "traffic analyst panel". Se debe hacer un "modelo de componentes", esto se puede apreciar de mejor manera en la sección de anexos, refiriéndose a partir de la figura 29 donde se encuentran las imágenes cuya descripción procedimental es descrita a continuación. Al seleccionar la 3era calle de la zona 1 como el sujeto de estudio, se procede a seleccionar el evento "2". En él se establece el período de simulación, en este caso se selecciona el evento 2, que va de las 9:00 hasta las 15:00. En ella, como indican los datos de la municipalidad de Guatemala, es el ciclo 2. Para fines prácticos se realizará una simulación de una hora, entre las 9:00 y 10:00 la cual será la hora típica con la que se realizarán las simulaciones. La distribución con la cual se describe la llegada de automóviles, se utilizó de acuerdo con las recomendaciones de la normativa AASHTO. En ella, se hace uso de uno de los preestablecidos del software Infracore, el cual considera los vehículos establecidos en la normativa AASHTO y la combinación predeterminada. En este caso, la relación es principalmente 40 por ciento carros pequeños, 30 por ciento automóviles grandes, 10 por ciento medianos, 10 por ciento tipo SUV y finalmente, 5 por ciento VAN y 5 por ciento camiones, que principalmente representa el transporte pesado y transporte público que transita por el Centro Histórico.

Para seguir con la modelación, es necesario tomar en cuenta un supuesto para el cual la metodología propuesta es válida. Partiendo de la referencia de la normativa, tanto AASHTO como lo que indica la referencia de "ingeniería de tránsito": "para calzadas de sentido único, la capacidad

básica y posible en una vía ideal, es de 2000 vehículos/hora por carril”. Además, se aprecia en la Figura (1) los niveles de servicio que indican que un flujo vehicular de 2000 vehículos/hora es un indicador que la carretera esta aproximadamente en un nivel de servicio entre E y F, estado actual de las carreteras del Centro Histórico (Board, 2010) . Dado que no se tienen datos específicos de los conteos vehiculares, se procede a realizar el supuesto de este trabajo de graduación, el cual se mantendrá constante durante las simulaciones propuestas. En este caso se aplicó para cada una de las formadas con la 3.a avenida del Centro Histórico; programar el tipo de giro permitido por intersección y agruparlas en función del semáforo que controla ese giro. A continuación, se muestra el caso particular de la intersección de la 3.a calle con la 17.a avenida. Se agrupa el giro principal hacia el sentido sur a norte y sur a oeste en el primer grupo, mientras que el segundo grupo muestra los giros que van de este a oeste y de este a norte.

Una vez todos los semáforos han sido adecuados a la realidad -en este caso se hizo con base en los datos proveídos por la Municipalidad de Guatemala- se genera la programación de los semáforos basada en los grupos de semaforización. Se toman los datos de la municipalidad de Guatemala, tomando en cuenta que es el ciclo 2 que corresponde al período que va de lunes a viernes de 9:00 a 15:00, siendo la fase principal la avenida (60 segundos de fase verde por 40 segundos de fase roja). Se ingresan los valores máximos y mínimos, que se refiere al retraso o anticipación que puede simular; según el manual de Infracore, se recomienda dejar el valor mínimo como 0, mientras que el valor máximo puede ser ligeramente superior a la totalidad de la fase. Para fines prácticos, se toman 10 segundos más.

Dentro de la posible sincronización que se le puede dar a toda la intersección, se programa el ciclo; el tiempo de offset representa la variación entre semáforos, sin embargo, para la primera simulación no se toma en cuenta. Con todos los pasos anteriores establecidos, se realiza la misma programación con el fin de tener toda la información por intersección cargada en el modelo. A continuación, se muestra un resumen de las intersecciones adecuadas con el procedimiento mostrado.

## 2. Validación del modelo

- Correr simulaciones con el software y obtener valores con el fin de tener un sesgo bajo, respecto a los datos recolectados.
- Optimizar el modelo para obtener uno que represente los valores actuales, con el fin de validar los resultados del trabajo de graduación.

## 3. Generación de propuestas

- Simular diferentes propuestas como posibles soluciones y determinar cual (o qué combinación) es la más eficiente.
- Proponer una o varias soluciones para los puntos de mayor congestionamiento y evaluar sus posibles efectos en el modelo del Centro Histórico.
- Obtener datos de la solución más adecuada a la infraestructura actual y tabularlos de manera simple para presentar como resultados del trabajo de graduación.
- Para fines de este proyecto de graduación, se propone hacer una secuencia de olas verdes de 12 segundos, 15 segundos y una secuencia de olas rojas.

En las imágenes de a continuación se encuentran los resultados de la evaluación del semáforo de la intersección ubicada en la 2da avenida y 5 calle de la zona 1. Cómo se aprecia en el primer cuadro, se trabajan diferentes ciclos dependiendo del día y la hora. Entre semana se encuentra una programación y en fin de semana, se vuelven a utilizar los ciclos de entre semana, pero en diferentes horarios.

El análisis propuesto muestra los tiempos actuales de semaforización propuestos y ejecutados por la Municipalidad de Guatemala.

**Cuadro 1:** *Distribución de ciclos lunes a viernes - 2.a avenida 5.a calle, zona 1*

Horario	Ciclo
3:30 - 9:00	1
9:00 - 15:00	2
15:00 - 19:30	3
19:30 - 3:30	4

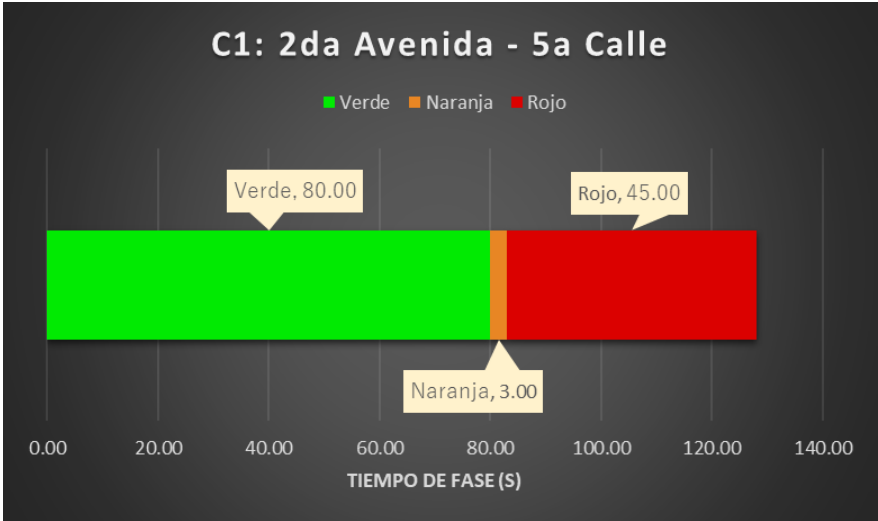
**Nota.** Elaboración propia.

**Cuadro 2:** *Distribución de ciclos sábado y domingo - 2.a avenida 5.a calle, zona 1*

Horario	Ciclo
5:30 - 19:30	3
19:30 - 5:30	4

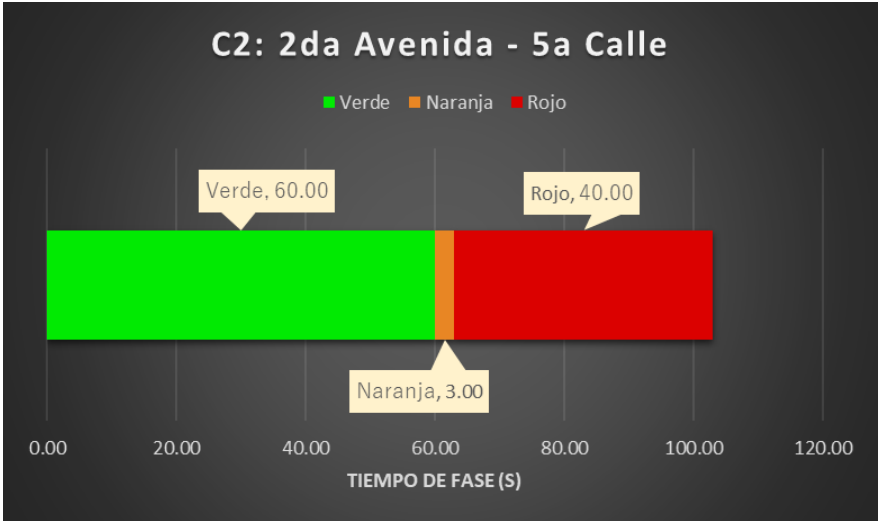
**Nota.** Elaboración propia.

Figura 6: Ciclo 1 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1.



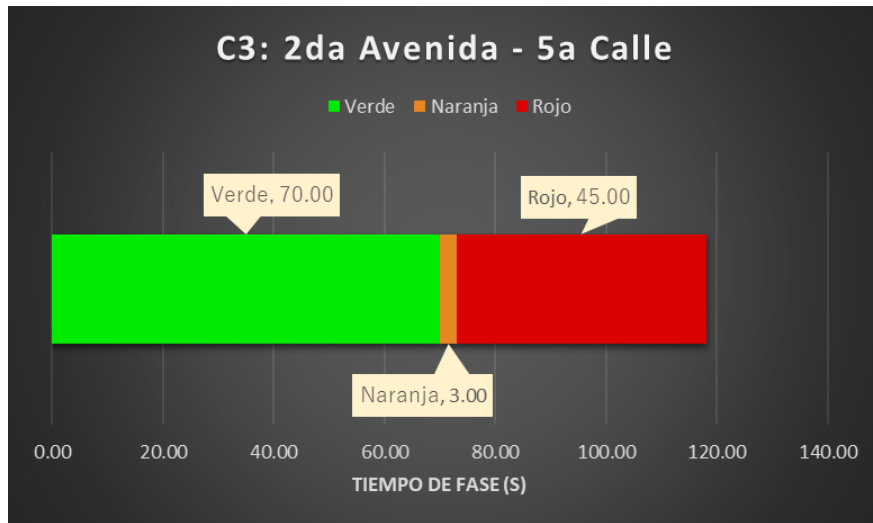
Nota. Elaboración propia.

Figura 7: Ciclo 2 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1.



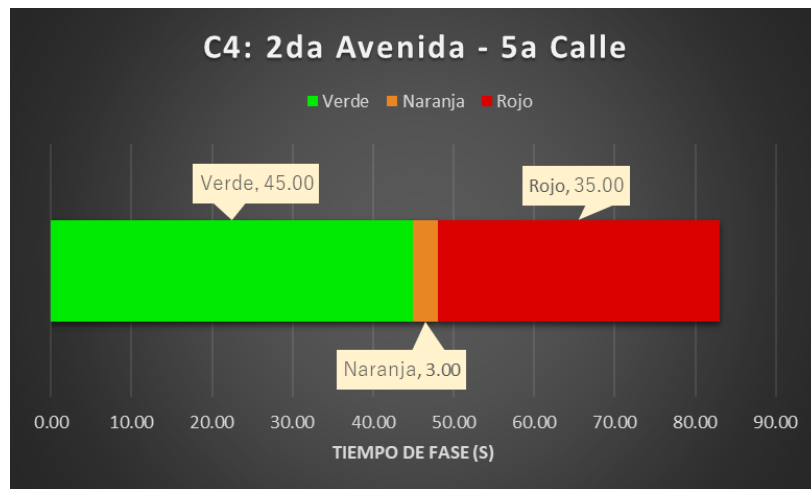
Nota. Elaboración propia.

**Figura 8:** *Ciclo 3 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1.*



**Nota.** Elaboración propia.

**Figura 9:** *Ciclo 4 - 2.a avenida 5.a calle, zona 1.*



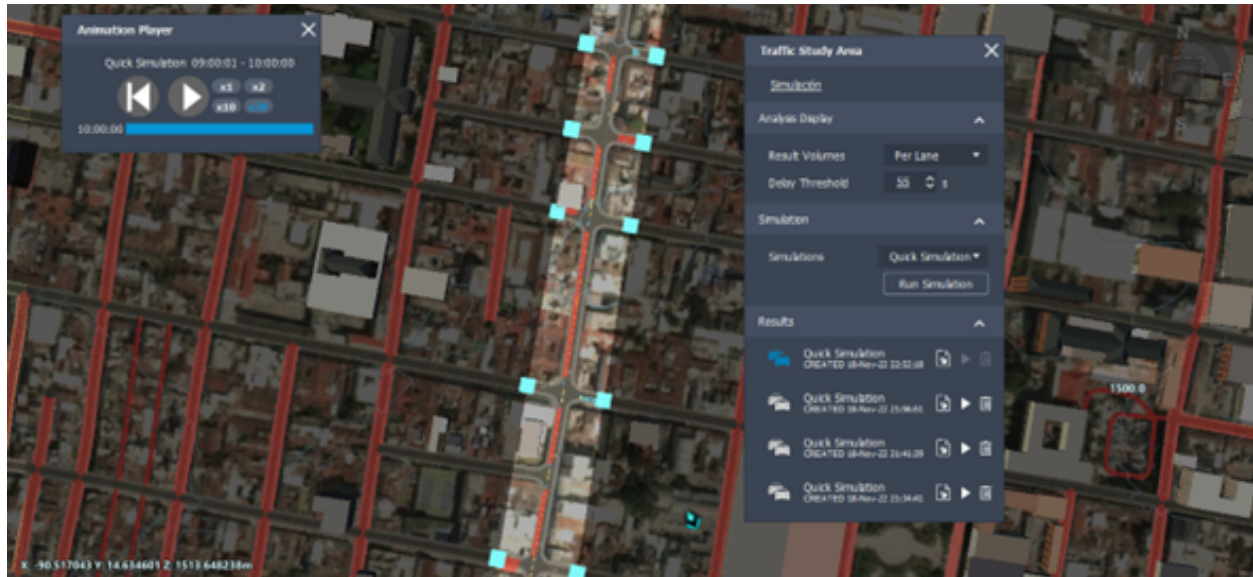
**Nota.** Elaboración propia.

La simulación se realizó en función de los parámetros indicados en la parte de metodología. A partir de estos indicadores y de los supuestos tomados para el análisis, se realizó una simulación de una hora para representar el tráfico que se genera sobre la 3era avenida, la cual según la entrevista realizada con la Municipalidad de Guatemala, mantiene la misma distribución de semáforos que la presentada previamente.

El programa utilizado genera los resultados que representa la cantidad de cola en metros (Queue) que representa la acumulación de automóviles que se detienen y generan “cola”. A partir de ello es que se puede tener una estimación cuantitativa de cómo se representa el tráfico en el Centro Histórico.

Infraworks también analiza el tiempo de parada que tienen los vehículos por intersección, esto lo representa como un tiempo promedio de retraso. Para fines del presente análisis, este tiempo es el que se considera como crítico. Finalmente, el software representa con colores (rojo y celeste) el status del comportamiento del tráfico por cada tramo carretero.

**Figura 10:** *Modelo de simulación.*



**Nota.** Elaboración propia.

A continuación, se adjunta un link que dirige a un video que muestra los resultados obtenidos mediante la simulación con Infraworks:

<https://drive.google.com/file/d/1IAD0gKbfat-Be-OegoA6BXSPHfpo6vbW/view?usp=sharing>

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de la simulación:

**Cuadro 3:** Colas generadas sobre la 3.a avenida - Estado actual

Tramo	Queue (m)	AVG delay (s)
18 - 17	46.20	97
17 - 16	71.60	151
16 - 15a	64.10	73
15a - 15	83.50	152
15 - 14	76.20	228
14 - 13	71.10	341
13 - 12a	144.60	1016
12a - 12	45.30	640
12 - 11	44.20	231
11 - 10	10.60	36
10 - 9a	32.60	261
9a - 9	11.90	172
9 - 8	11.80	103
8 - 7	20.60	196
7 - 6	10.40	102
6 - 5	9.00	102
5 - 4a	9.00	92
4a - 4	9.00	92
4 - 3	5.00	107
3 - 2	5.00	107
<b>Total</b>	<b>760.20</b>	<b>4268</b>

**Nota.** Elaboración propia.

Tal y como se muestra en el cuadro 3 las colas (Queue) están expresados en metros y el retraso promedio (AVG delay) en segundos. En ella se puede apreciar que los tramos que presentan una mayor acumulación y por ende, un problema de tráfico son los tramos:

- 13-12a
- 12a-12
- 14-13

Dado que no se posee la información sobre los conteos reales de cuántos vehículos pasan por hora exactamente, no existe un valor preciso de comparación para determinar si el modelo está calibrado. Por lo tanto, se opta por mostrar la mayor cantidad de datos posibles de la modelación para realizar una comparación con las futuras propuestas de optimización.

Dichos resultados se muestran a continuación en el cuadro 4. Se puede apreciar el estado actual en términos de la longitud de los tramos entre intersecciones, el tiempo que les tomaría en condiciones ideales avanzar y finalmente, el retraso en segundos que se acumula.

**Cuadro 4:** *Delay generado sobre la 3.a avenida - Estado actual*

<b>Tramo</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Delay (s)</b>
17 - 16	43.00	7.74	8.00
16 - 15a	38.00	6.84	7.00
15a - 15	54.00	9.72	10.00
15 - 14	87.20	15.70	16.00
14 - 13	112.00	20.16	21.00
13 - 12a	39.50	7.11	7.00
12a - 12	43.00	7.74	8.00
12 - 11	69.40	12.49	13.00
11 - 10	70.80	12.74	13.00
10 - 9a	52.10	9.38	10.00
9a - 9	72.40	13.03	14.00
9 - 8	43.40	7.81	8.00
8 - 7	41.80	7.52	8.00
7 - 6	47.30	8.51	9.00
6 - 5	38.50	6.93	7.00
5 - 4a	84.20	15.16	16.00
4a - 4	113.00	20.34	21.00
<b>Promedio</b>		<b>11.11</b>	<b>12.88</b>

**Nota.** Elaboración propia.

Dentro de las propuestas para comparar los beneficios de utilizar las metodologías descritas en este trabajo de graduación, se encuentran:

- Ola verde con sincronización de 12 segundos

Para esta propuesta se realizó una sincronización donde los semáforos van cambiando la fase roja a fase verde con un desfase de 12 segundos entre cada una de las intersecciones. Esto hace sentido, debido a que como se observa en el cuadro 4 12 segundos es aproximadamente el tiempo que les toma en promedio a los vehículos avanzar entre cada una de las intersecciones, así como el promedio del delay.

Los resultados obtenidos de dicha simulación se encuentran a continuación en el cuadro 5

**Cuadro 5:** *Colas generadas sobre la 3.a avenida - Ola verde 12s*

<b>Tramo</b>	<b>Queue (m)</b>	<b>AVG delay (s)</b>
18 - 17	44.20	86
17 - 16	76.20	139
16 - 15a	64.00	65
15a - 15	86.20	135
15 - 14	80.00	190
14 - 13	72.90	309
13 - 12a	151.90	973
12a - 12	44.20	636
12 - 11	24.20	241
11 - 10	18.70	312
10 - 9a	52.90	263
9a - 9	11.70	161
9 - 8	10.40	101
8 - 7	20.70	237
7 - 6	20.70	119
6 - 5	0.00	0
5 - 4a	16.80	276
4a - 4	3.00	200
4 - 3	4.50	85
<b>Total</b>	<b>759.60</b>	<b>4408</b>

**Nota.** Elaboración propia.

- Ola verde con sincronización de 15 segundos

Se realizaron diversas simulaciones variando el tiempo de duración de la ola verde, hasta encontrar un tiempo de desfase que diera los mejores resultados en términos de tener un delay más bajo. Dicho valor fue 15 segundos y los resultados se muestran a continuación en el cuadro 6

**Cuadro 6:** *Colas generadas sobre la 3.a avenida - Ola verde 15s*

<b>Tramo</b>	<b>Queue (m)</b>	<b>AVG delay (s)</b>
18 - 17	43.40	93
17 - 16	73.30	152
16 - 15a	56.80	69
15a - 15	86.20	148
15 - 14	81.60	205
14 - 13	73.00	308
13 - 12a	143.00	862
12a - 12	43.00	568
12 - 11	25.50	239
11 - 10	18.00	332
10 - 9a	52.00	277
9a - 9	11.70	173
9 - 8	10.40	110
8 - 7	20.60	233
7 - 6	20.60	102
6 - 5	0.00	0
5 - 4a	16.70	276
4a - 4	3.00	145
4 - 3	4.00	140
<b>Total</b>	<b>732.20</b>	<b>4044</b>

**Nota.** Elaboración propia.

- Ola roja

Finalmente, como una tercera opción se propone no una sincronización del tipo ola verde y más bien, una ola roja. Para ello, el tiempo de desfase coincide de tal forma que cada vez que los automóviles se acerquen a la intersección, la fase roja esté en dicho semáforo. Los resultados se muestran a continuación en el cuadro 7

**Cuadro 7:** Colas generadas sobre la 3.a avenida - Ola roja

<b>Tramo</b>	<b>Queue (m)</b>	<b>AVG delay (s)</b>
18 - 17	42.70	76
17 - 16	67.60	49
16 - 15a	56.90	29
15a - 15	82.90	114
15 - 14	81.60	187
14 - 13	70.80	210
13 - 12a	142.80	1074
12a - 12	43.90	793
12 - 11	23.90	243
11 - 10	18.00	312
10 - 9a	52.90	243
9a - 9	11.70	116
9 - 8	0.00	0
8 - 7	10.80	127
7 - 6	21.00	364
6 - 5	0.00	0
5 - 4a	16.70	140
4a - 4	3.30	151
4 - 3	3.30	140
<b>Total</b>	<b>740.50</b>	<b>3874</b>

**Nota.** Elaboración propia.

- Comparación de resultados

El Cuadro 8 muestra una comparativa entre los resultados de las tres propuestas. Se calcula el porcentaje de reducción de cada opción; queda demostrado que tanto en términos de longitud de *queue* como en delay promedio, la mejor opción es la de olas rojas.

**Cuadro 8:** *Comparación entre propuestas*

<b>Propuesta</b>	<b>Queue (m)</b>	<b>%</b>	<b>AVG delay (s)</b>	<b>%</b>
Original	760.20	100.0	4268.00	100.0
Verde 12s	759.60	99.9	4408.00	103.3
Verde 15s	732.20	96.3	4044.00	94.8
Roja	740.50	97.4	3874.00	90.8

**Nota.** Elaboración propia.

La conclusión de este análisis es que, al tener una carretera de tipo E o F, con la infraestructura actual, la mejora en semaforización no presenta una ventaja significativa. Por lo tanto, debido a la cantidad de automóviles que transitan por el Centro Histórico de Guatemala, las carreteras no están preparadas para brindar un mejor servicio del actual si se toma como referencia la mejora en la semaforización. Se recomienda más bien que se opte por una mejora en el sistema de transporte público, con el fin de reducir la demanda a la que se enfrenta la infraestructura existente y no sea necesario como tal aumentar las carreteras actuales que se encuentran de por sí saturadas.

- Tras definir la zona de estudio del Centro Histórico, se realizaron dos simulaciones que representan el sistema de semaforización sincronizado como propuesta para la mejora del tráfico.
- Se recolectaron datos de los tiempos de semaforización de la Municipalidad de Guatemala que fueron incluidos en el modelo para realizar la simulación.
- El análisis realizado en el presente trabajo de graduación se basa en proporciones estadísticas e iteraciones para determinar el tiempo promedio de tráfico y la longitud de cola que se genera.
- El modelo de simulación fue realizado en Infracore para un análisis considerando los tiempos de fase de la semaforización actual, que puede ser ajustado a las necesidades del análisis.
- Se realizó la propuesta con modificaciones en los tiempos de semaforización, con el fin de obtener los tiempos de espera que sufren los vehículos que transitan por el Centro Histórico.

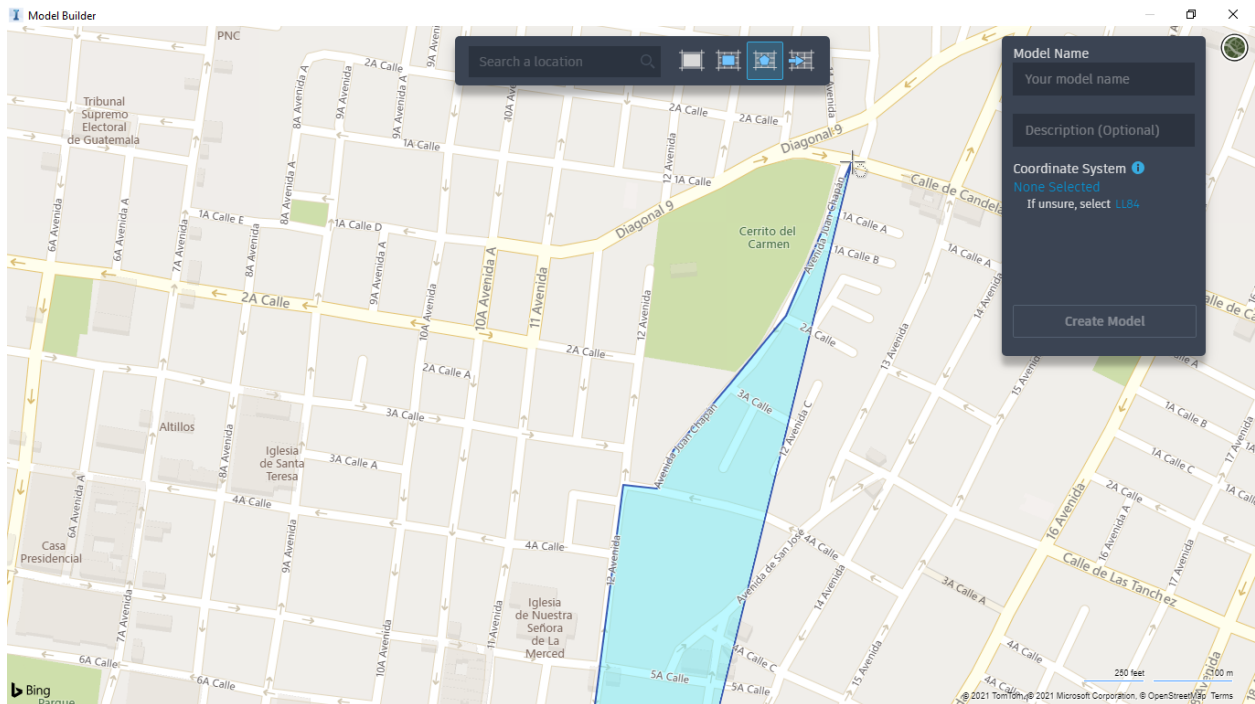
- Para futuros trabajos de graduación, se recomienda realizar el mismo análisis mediante la vinculación a un software de geolocalización, como QGIS.
- Delimitar el área de estudio en función de la traza urbana que pueda mostrar la zona seleccionada.
- Se recomienda recolectar la información sobre los conteos vehiculares por cada intersección a analizar, con el fin de realizar un análisis más detallado de la situación actual de las carreteras y propuestas más aterrizadas. Para fines del presente trabajo de graduación, el modelo queda adecuado para adaptarse a dicha data.
- Según los semáforos en el Centro Histórico, únicamente se puede proponer un tipo de tiempo de ciclo en general, ya que es complicada la variación en tiempo real de los semáforos. Por lo tanto, se recomienda una actualización de los semáforos, para obtener mayor información y mejorar los niveles de servicio de las carreteras existentes.
- Para la academia, se recomienda aumentar dentro de la malla curricular de las Licenciaturas en Ingeniería Civil Industrial y Arquitectónica los cursos enfocados al urbanismo; incluir simulaciones de tráfico y refuerzos en la herramienta Infracore.
- Para la academia, partiendo del estudio de las diversas ramas de la ingeniería civil y el aumento en el quorum a través de los años que estas presentan, se recomienda la inclusión de un curso selectivo enfocado en los nichos que la ciencia ofrece.
- Para la academia se recomienda la modificación de los cursos de infraestructura vial para incluir este tipo de simulaciones dentro de la malla curricular.
- Para las instituciones gubernamentales pertinentes (Estado y municipalidades), se recomienda la remodelación de pasarelas, aceras, ciclovías y pasos peatonales que presentan condiciones adversas o deterioro para los usuarios con el fin de priorizar y hacer digna el tránsito peatonal.
- Para las instituciones gubernamentales, principalmente municipalidades, se recomienda hacer trabajos conjuntos con estudiantes de la Licenciatura de Ingeniería Civil para análisis complementarios y similares.

- Akademik. (2010). *Paso a desnivel*. <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/910118>
- Autodesk. (s.f.). *Infraworks civil infrastructure conceptual design software*. <https://www.autodesk.com/products/infraworks>
- Autodesk. (2016). *Infraworks 360 traffic simulation*. <https://www.autodesk.com/products/infraworks>
- Barrientos, V. (2019). *Datos, variables y medición*. <https://gazeta.gt/datos-variables-y-medicion/>
- Beetrack. (s.f.). *Tráfico y logística: funciones de un director de tráfico y transporte*. <https://www.beetrack.com/es/blog/trafico-y-logistica-funciones-director-de-trafico-y-transporte>
- Board, T. R. (2010). *Highway capacity manual*. *Highway capacity manual*, 1-6.
- Cameros, L. (2004). *Propuesta para el paso a desnivel, intersección 1ra. Av. y salida a RN-14, Escuintla* [Tesis doctoral, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Carrasco, J., & Wazhima, J. (2012). *Diseño de la red semafórica de la calle Mariscal Lamar desde la calle Manuel Vega hasta la calle Tarqui* [Tesis doctoral, Universidad de Cuenca].
- Castañeda, H. (2021). *27-01-2021 - Carreteras red vial nacional*. *Curso diseño de carreteras*, 1-27.
- City, S. (2020). *La teoría del tráfico inducido y el transporte público*. <https://safecitying.com/la-teoria-del-trafico-inducido-y-el-transporte-publico/>
- CIV. (2021). *Glosario*. <https://www.caminos.gob.gt/glosario.html>
- de Guatemala, M. (s.f.). *Dirección de centro histórico*. <http://www.muniguate.com/centro-historico/>
- de Guatemala, M. (2008). *Dirección de planificación urbana*. <http://www.muniguate.com/direccion-de-planificacion-urbana/>
- Dokko, G. (2013). *Sistema de control de tránsito*. <https://www.mibelgrano.com.ar/sistemadecontroldetransito.htm>
- Fernández, R. (2010). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*, 1-235.
- FMU. (2010). *Coordinaciones y sincronismo*. <https://prospectivademovilidadurbana.weebly.com/onda-verde.html#>
- Fraile, N. (2018). *Intersecciones sin prioridad*. <http://revista.dgt.es/es/educacion-formacion/conducir-mejor/2018/0703Intersecciones-sin-prioridad.shtml#.YCnokty7200>

- Gestión, P. (2019). “Olas verdes” permitirían reducción de 30 en la espera de vehículos en semáforos. <https://gestion.pe/peru/olas-verdes-permitirian-reduccion-de-30-en-la-espera-de-vehiculos-en-semaforos-noticia/?ref=gesr>
- Hora, L. (2017). *Pasos a desnivel ¿Una ciudad al gusto de inmobiliarias y centros comerciales?* <https://lahora.gt/pasos-desnivel-una-ciudad-al-gusto-inmobiliarias-centros-comerciales/>
- Kineo. (s.f.). *Aforo y clasificación vehicular: mediante sistemas elevados*. <https://www.interempresas.net/Medicion/FeriaVirtual/Producto-Aforo-y-clasificacion-vehicular-71059.html>
- López, J. F. (2018). *Media*. <https://www.economipedia.com>
- López, J. F. (2019). *Moda*. <https://www.economipedia.com>
- López, J. F., & Sanjuán, M. (2019). *Mediana*. <https://www.economipedia.com>
- Lozano, A., Torres, V., & Antún, J. (2003). Tráfico vehicular. *Redalycs*, 18.
- Paredes, Cárdenas & Llamuca. (2016). *Análisis y evaluación de redondeles e intersecciones semaforizadas para mejorar la circulación vehicular en la circunvalación de la ciudad de Riobamba y propuesta de diseño geométrico en la intersección más crítica* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Chimborazo].
- Pedraza, L., Hernández, C., & López, D. (2013). Sistema de comunicación TCP/IP para el control de una intersección de tráfico vehicular. *ScienceDirect*, 12.
- Pérez, F., Bautista, A., Salazar, M., & Macias, A. (2014). Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico. *Dyna*, 81(184), 36-40.
- Pérez, J., & Gardey, A. (2016). *Definición de rotonda*. <https://definicion.de/rotonda/>
- Pinos, V. (2016). *Diseño de intersecciones en vías urbanas* [Tesis doctoral, Universidad del Usuy].
- Pura, A. (s.f.). *La planificación urbana o planeamiento urbanístico*. <https://www.arquitecturapura.com/planificacion-urbana/>
- QAZ. (2021). *Carretera elevada*. [https://es.qaz.wiki/wiki/Elevated\\_highway](https://es.qaz.wiki/wiki/Elevated_highway)
- Raffino, M. E. (2020). *Urbanización*. <https://concepto.de/urbanizacion/>
- Real Academia Española. (2020a). *Carretera*. <https://dle.rae.es/carretera>
- Real Academia Española. (2020b). *Urbanizar*. <https://dle.rae.es/urbanizar?m=form>
- Redacción. (2021). *Definición de subterráneo*. <https://conceptodefinicion.de/subteraneo/>
- República. (2019). *Cómo evitar el estrés causado por el tráfico vehicular*. <https://republica.gt/2019/12/14/como-evitar-el-estres-causado-por-el-trafico-vehicular/>
- Research, T. (2020). *Traffic research - Roadways*. <http://www.trafficresearch.co.uk/y>
- Sensagent. (2013). *Metro (sistema de transporte)*. <http://diccionario.sensagent.com/Metro>
- SIECA. (2000). *Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito. Manual centroamericano de dispositivos uniformes para el control del tránsito*, 1-434.
- SIMIO. (2019). *Student simulation competition - December 2019 - 2nd place*. <https://www.simio.com/academics/student-competition/December2019/TheEntities/>
- Spain, W. (s.f.-a). *Ingeniería de tráfico y seguridad vial*. <https://www.wsp.com/es-ES/servicios/traffic-engineering-and-road-safety>
- Spain, W. (s.f.-b). *Túneles*. <https://www.wsp.com/es-ES/sectores/tuneles>
- Studios, S. (2003). *Synchro Estudio 8 guía del usuario*. <https://www.trafficware.com/synchro.html>
- Vela, F. (2008). *Estudio de impacto vial: marco conceptual. Tesis: estudios de impacto vial*, 1-105.
- Webscolar. (2020). *¿Qué son las carreteras? Clasificación y aspectos de importancia*. <https://www.webscolar.com/que-son-las-carreteras-clasificacion-y-aspectos-de-importancia>
- Westreicher, G. (2020). *Precisión*. <https://www.economipedia.com>

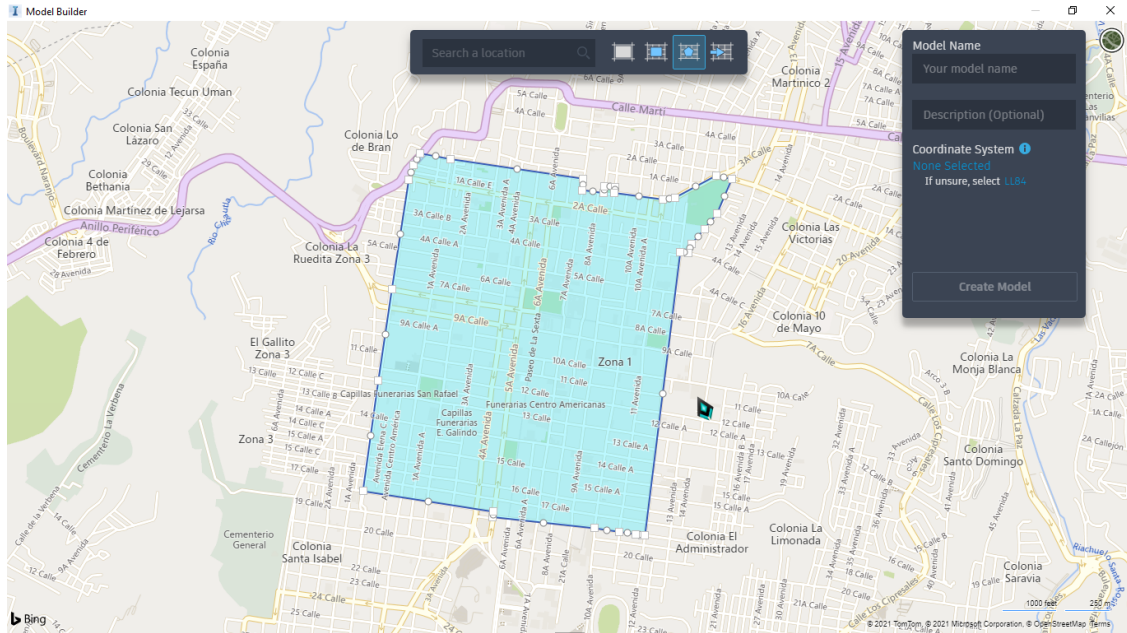
A. Figuras del modelo de Infracworks

Figura 11: Zona de estudio.



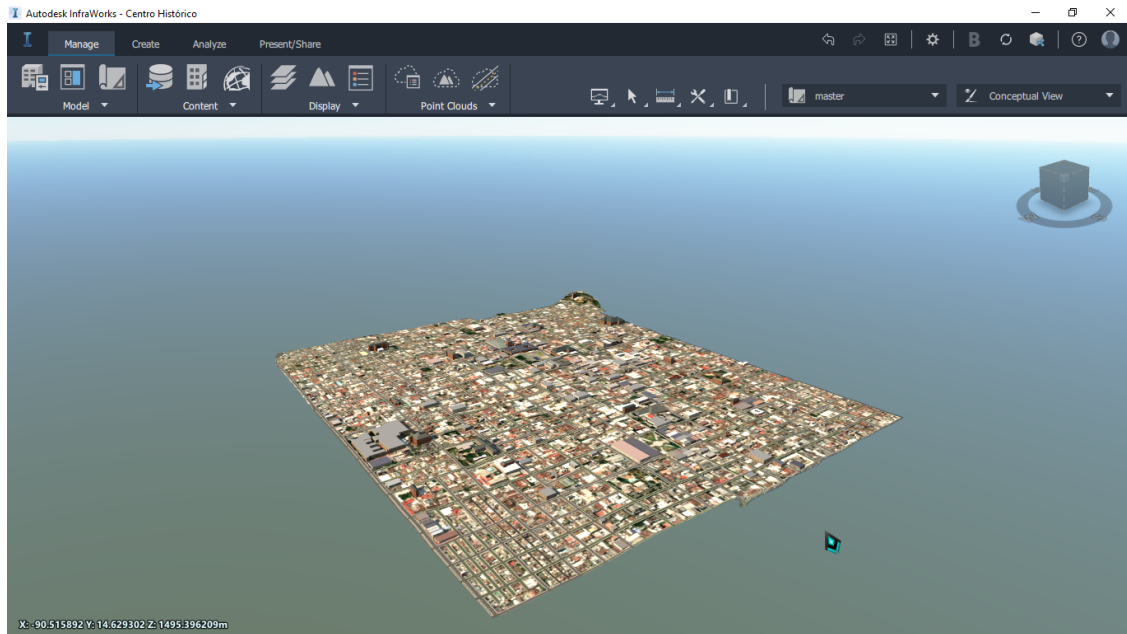
**Nota.** Captura de pantalla de *Infracworks*.

Figura 12: Delimitación de la zona de estudio.



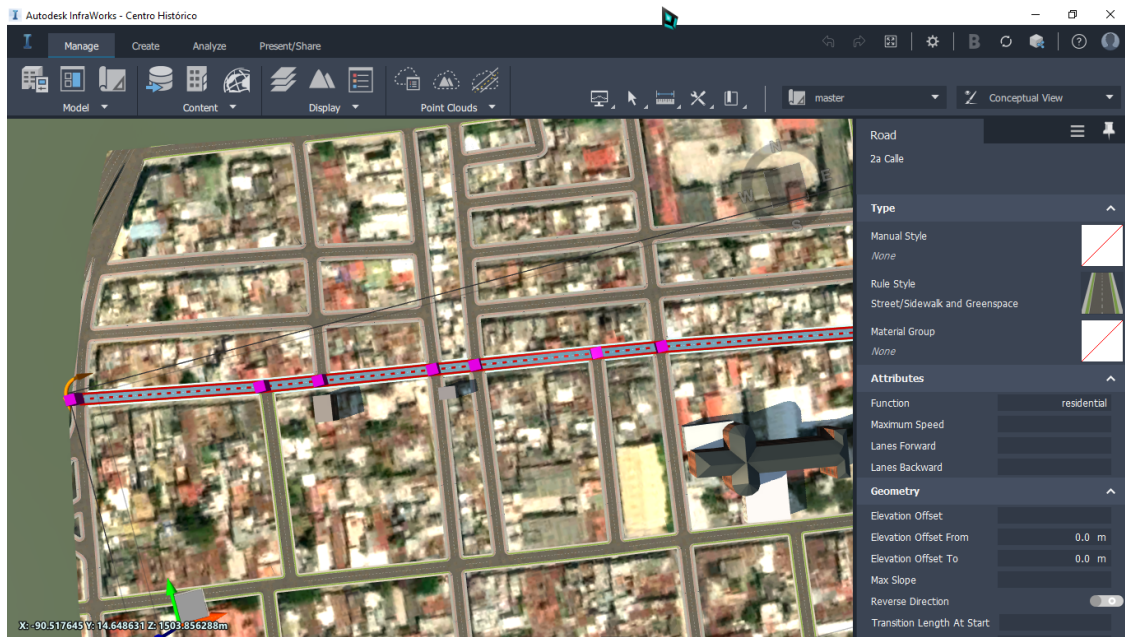
Nota. Captura de pantalla de *Infracad*.

Figura 13: Centro Histórico cargado en *Infracad*.

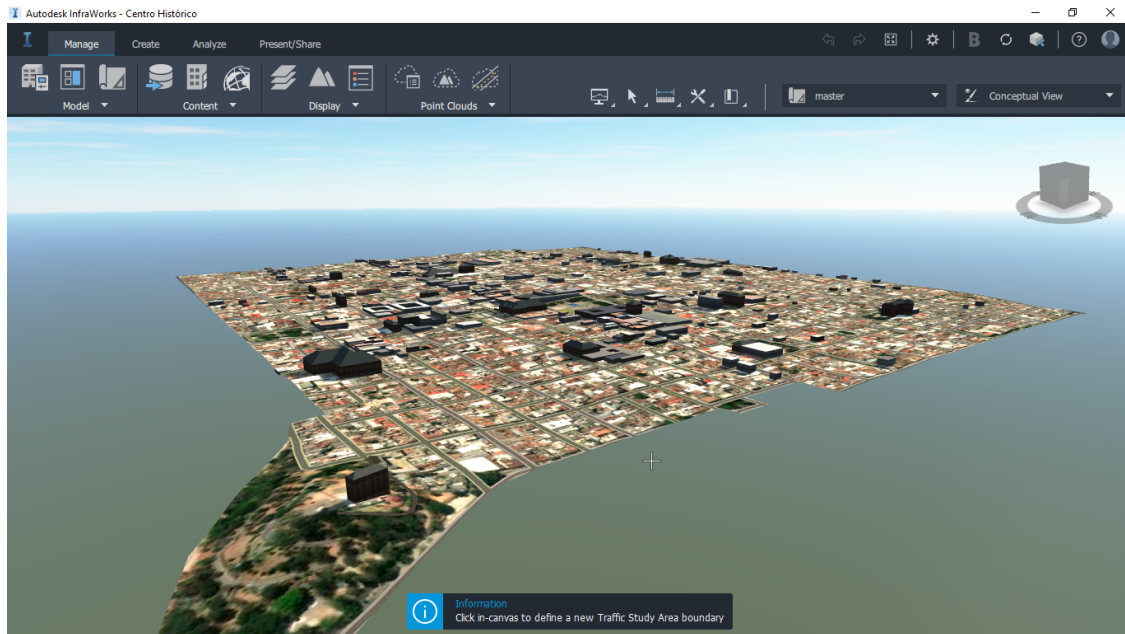


Nota. Captura de pantalla de *Infracad*.

Figura 14: Calle para análisis del Centro Histórico.

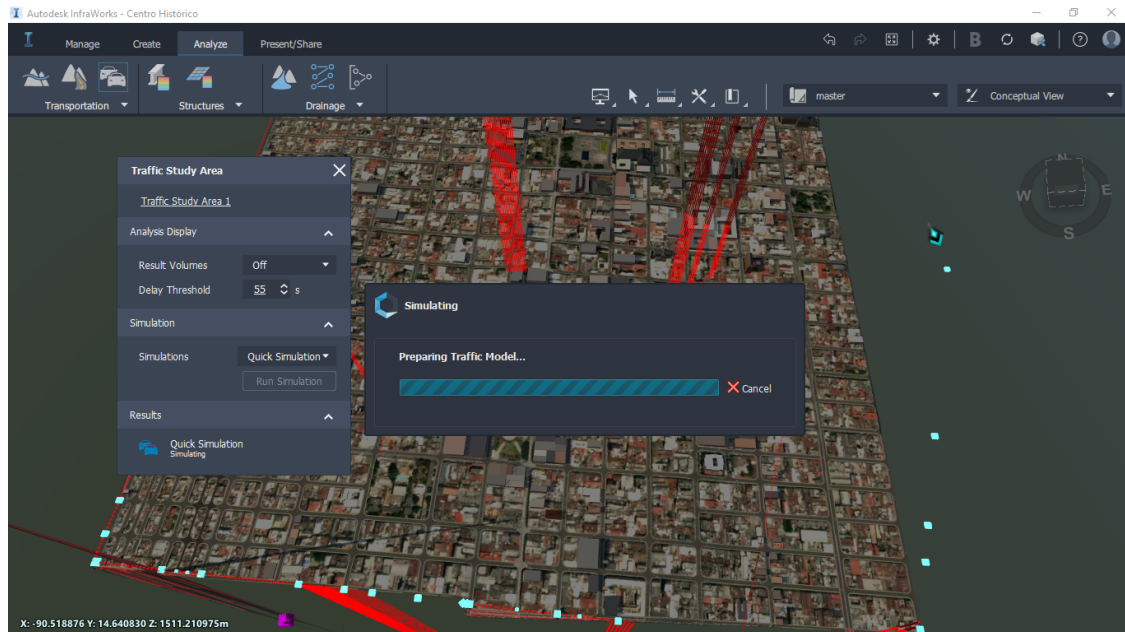


Nota. Captura de pantalla de *Infraworks*.

Figura 15: Centro Histórico en *Infraworks*.

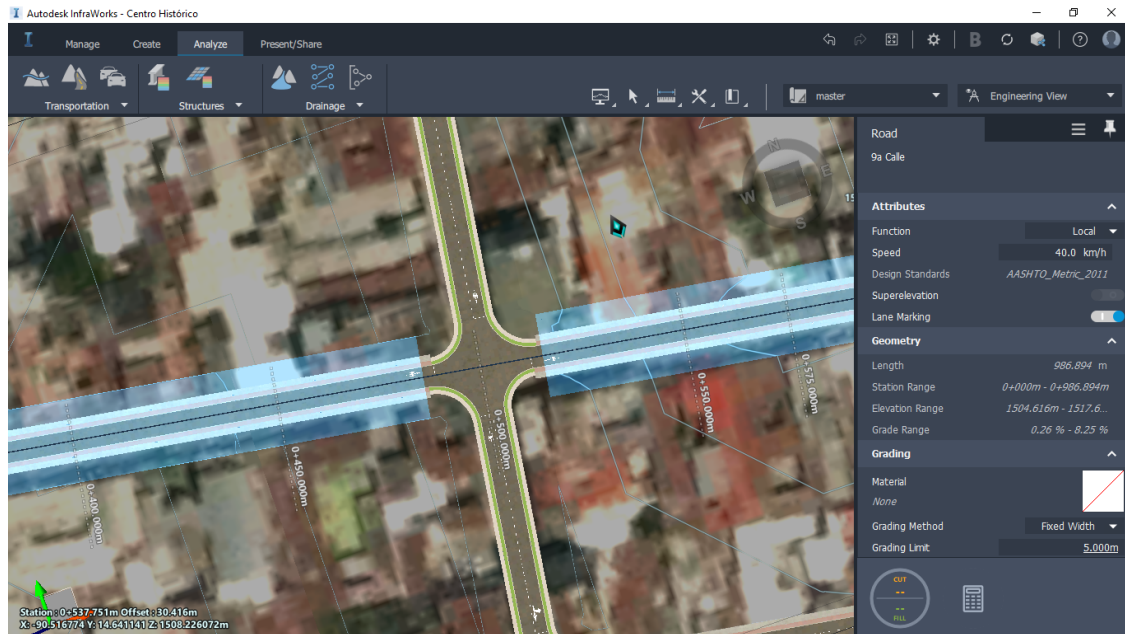
Nota. Captura de pantalla de *Infraworks*.

Figura 16: Análisis de tráfico en Infracworks.



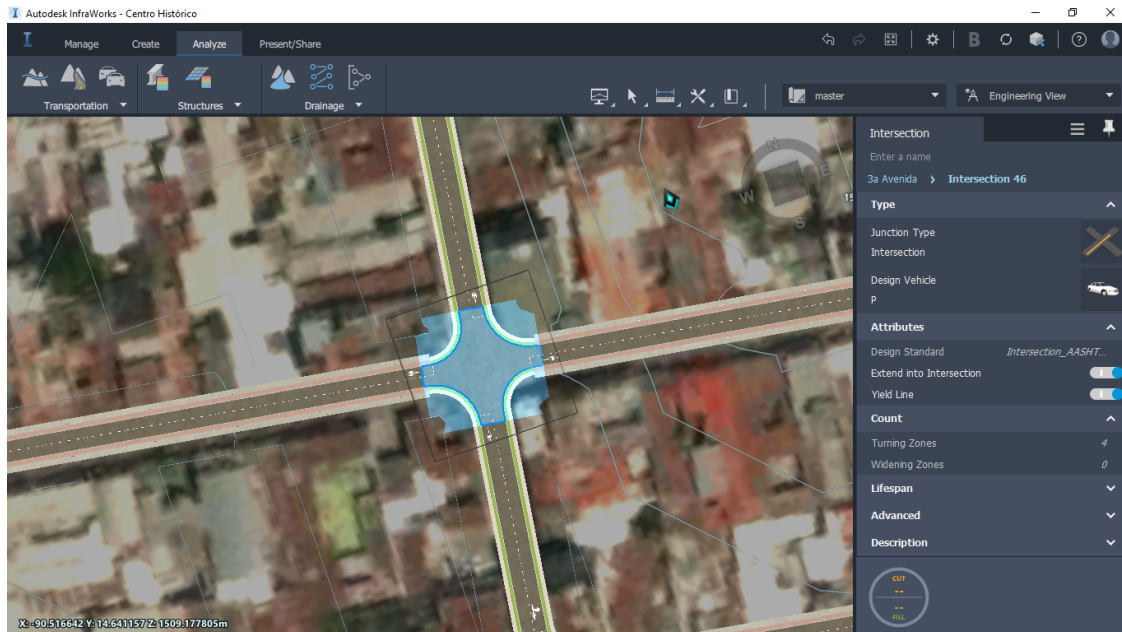
Nota. Captura de pantalla de *Infracworks*.

Figura 17: Caracterización típica de una calle en Infracworks.



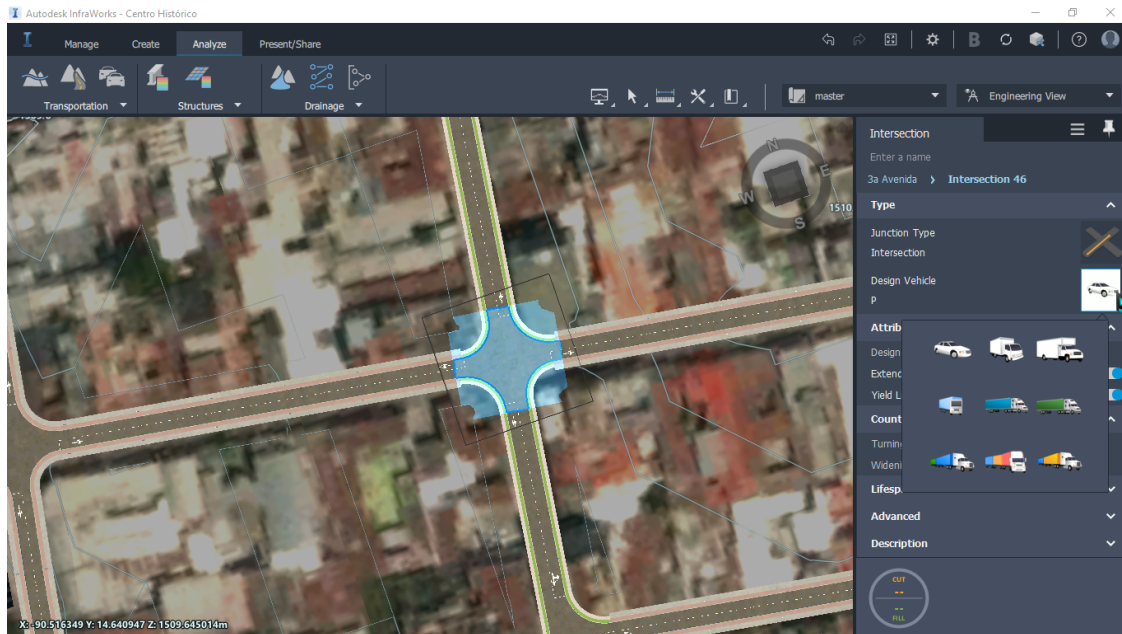
Nota. Captura de pantalla de *Infracworks*.

**Figura 18:** *Caracterización típica de una intersección en Infracworks.*



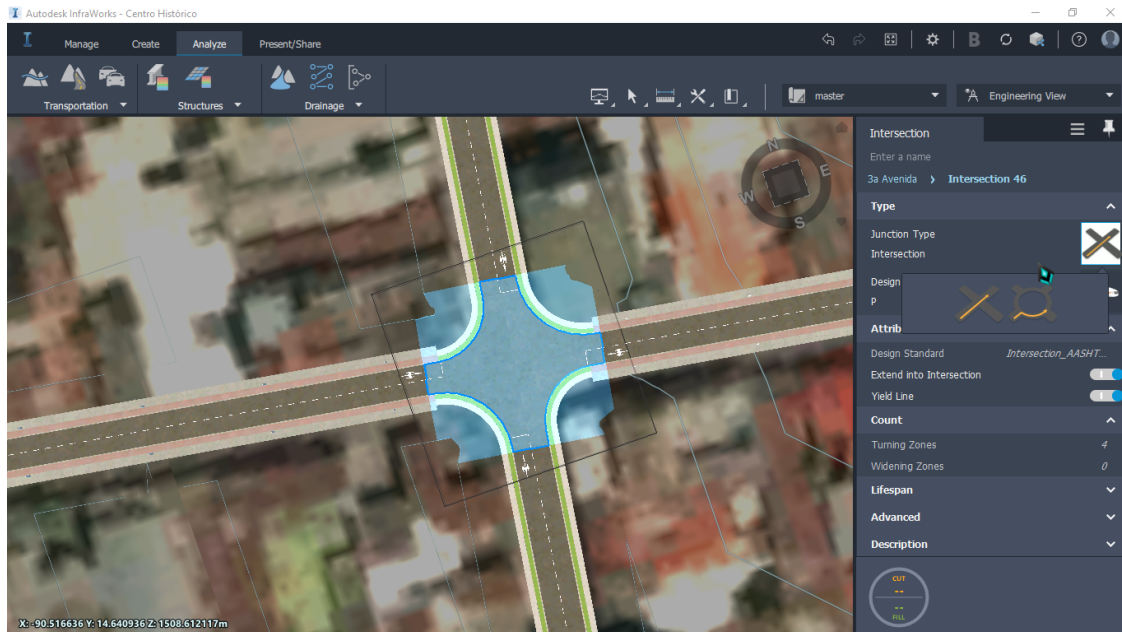
**Nota.** Captura de pantalla de *Infracworks*.

**Figura 19:** *Caracterización de los vehículos en Infracworks.*



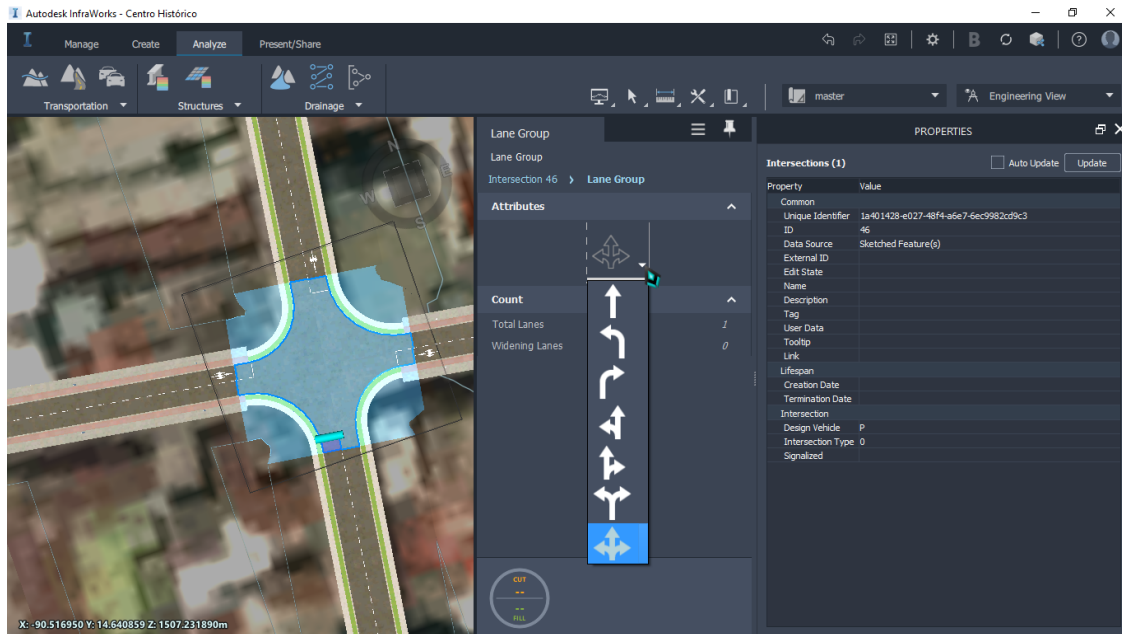
**Nota.** Captura de pantalla de *Infracworks*.

Figura 20: Caracterización del tipo de intersección en Infracworks.



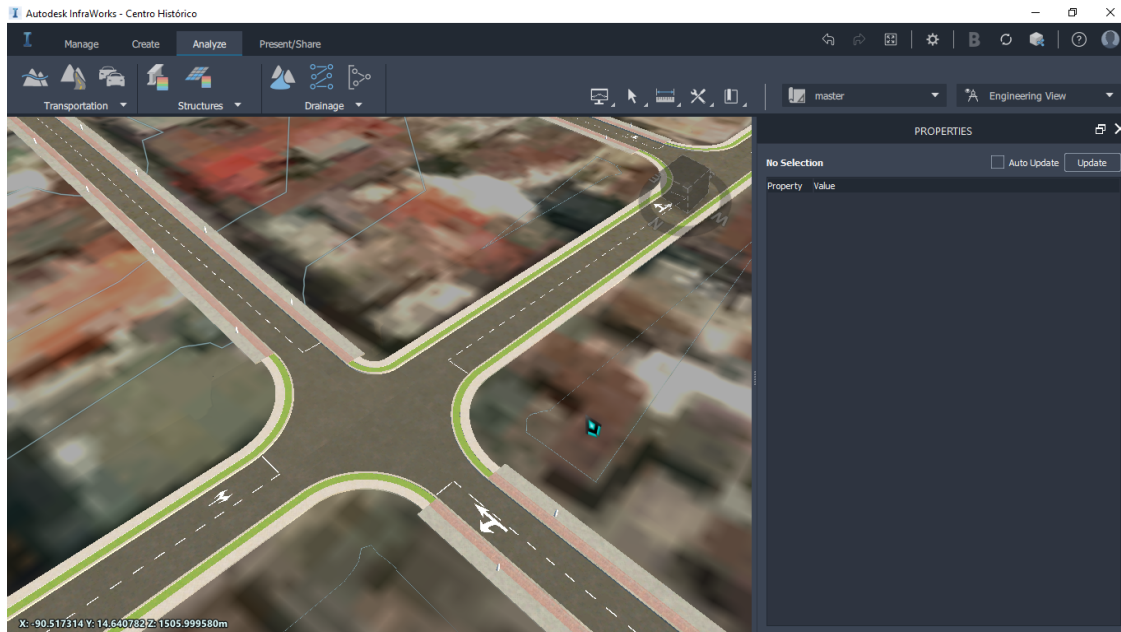
Nota. Captura de pantalla de Infracworks.

Figura 21: Caracterización de los giros permitidos en Infracworks.



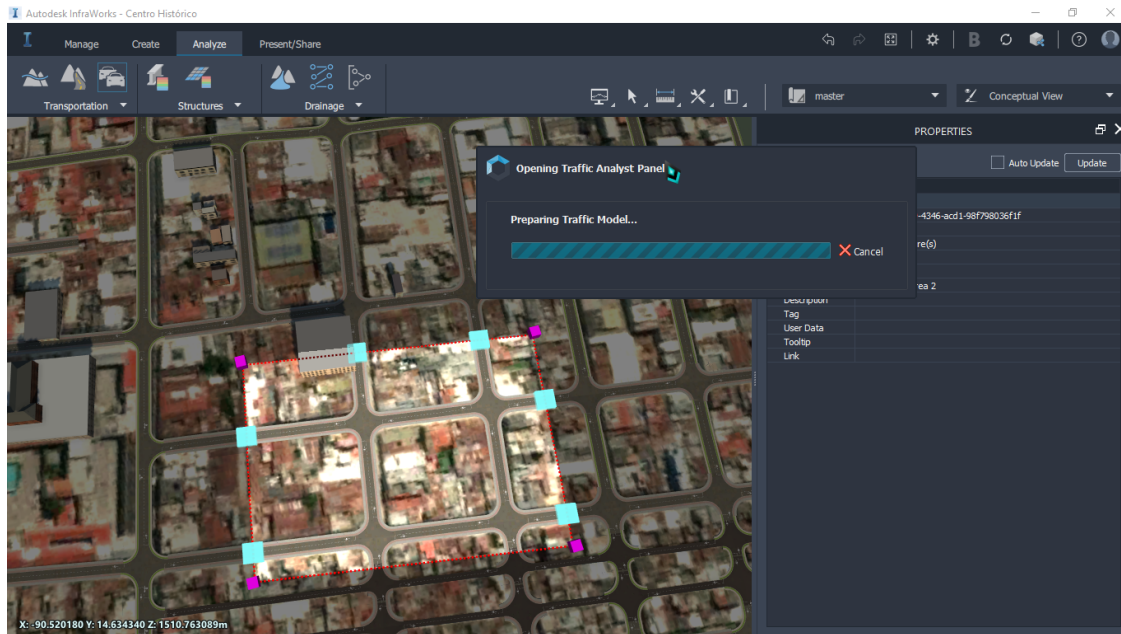
Nota. Captura de pantalla de Infracworks.

**Figura 22:** Caracterización de una intersección modificada en Infracworks.



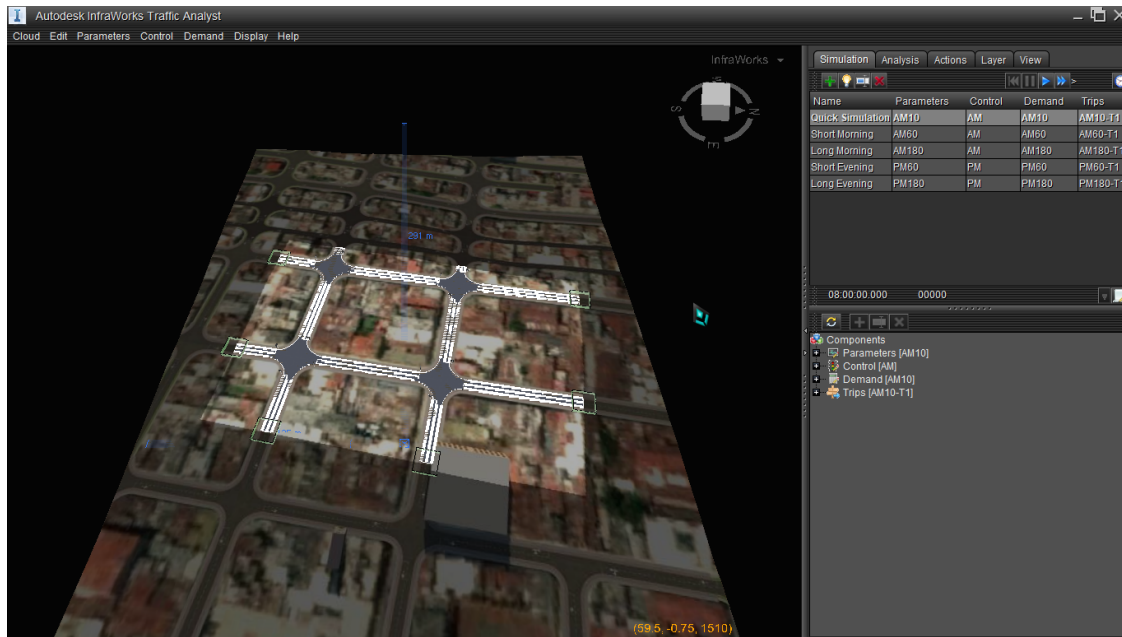
**Nota.** Captura de pantalla de *Infracworks*.

**Figura 23:** Delimitación de zona de prueba de simulación.



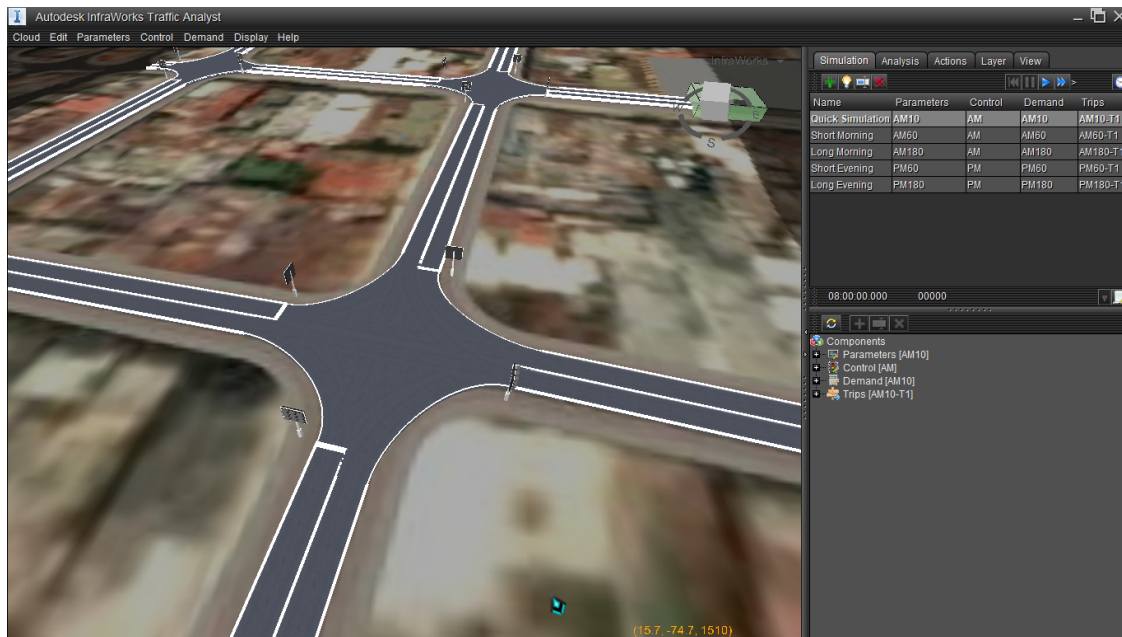
**Nota.** Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infracworks*.

**Figura 24:** Zona a simular en Infracworks.



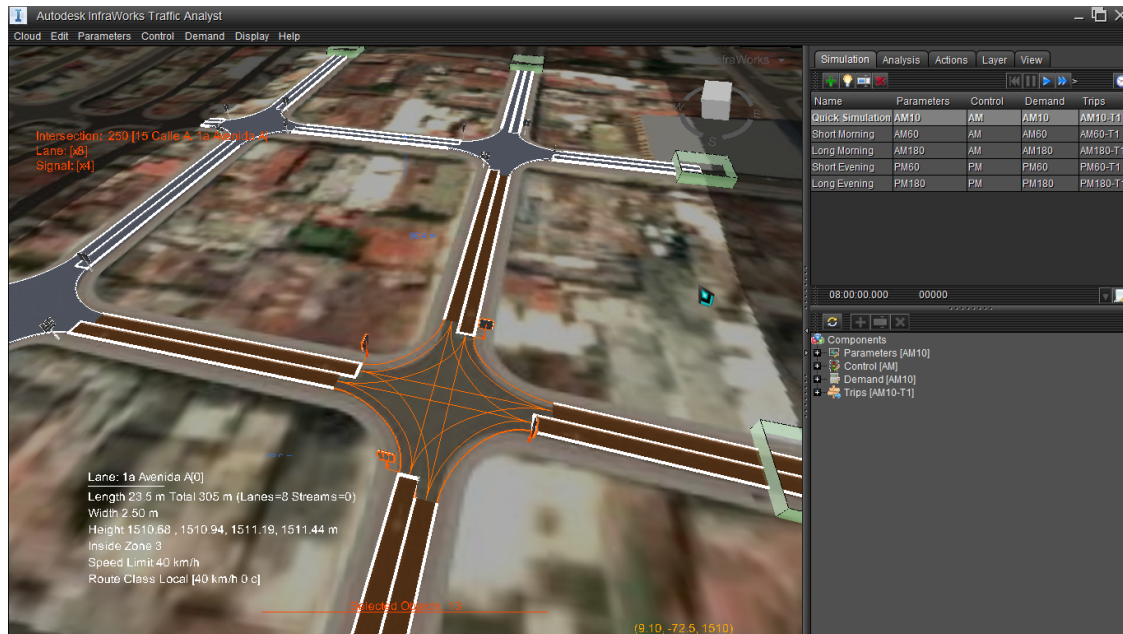
Nota. Elaboración propia.

**Figura 25:** Intersección analizada para simulación.



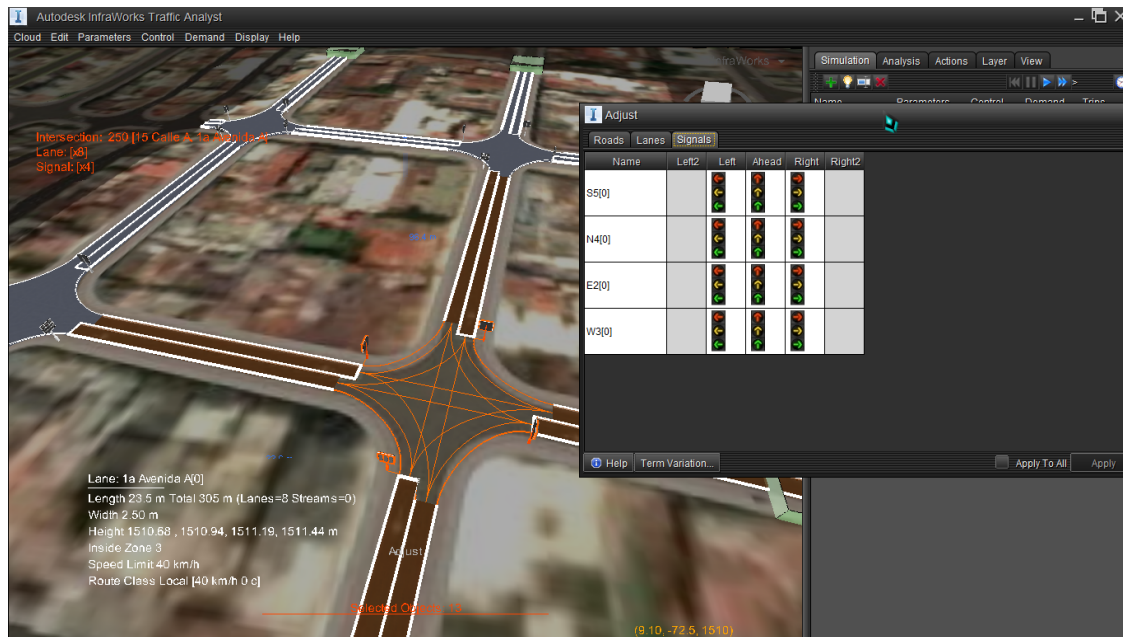
Nota. Elaboración propia.

Figura 26: Ajuste del comportamiento vehicular por intersección.



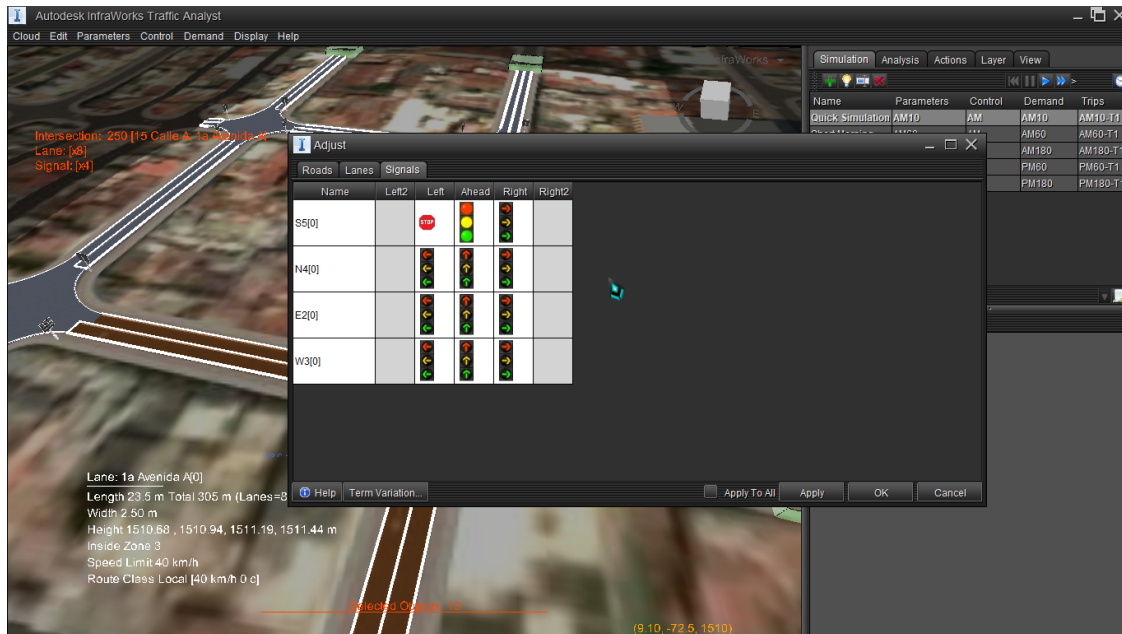
Nota. Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infraworks*.

Figura 27: Semaforización y señalización para simulación en *Infraworks 1*.



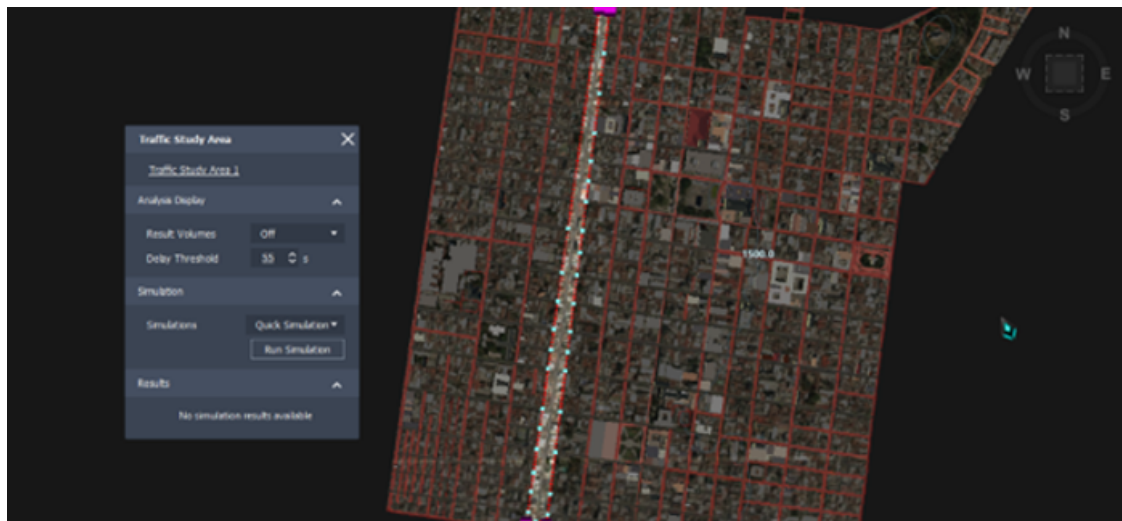
Nota. Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infraworks*.

**Figura 28:** *Semaforización y señalización para simulación en Infracworks 2.*



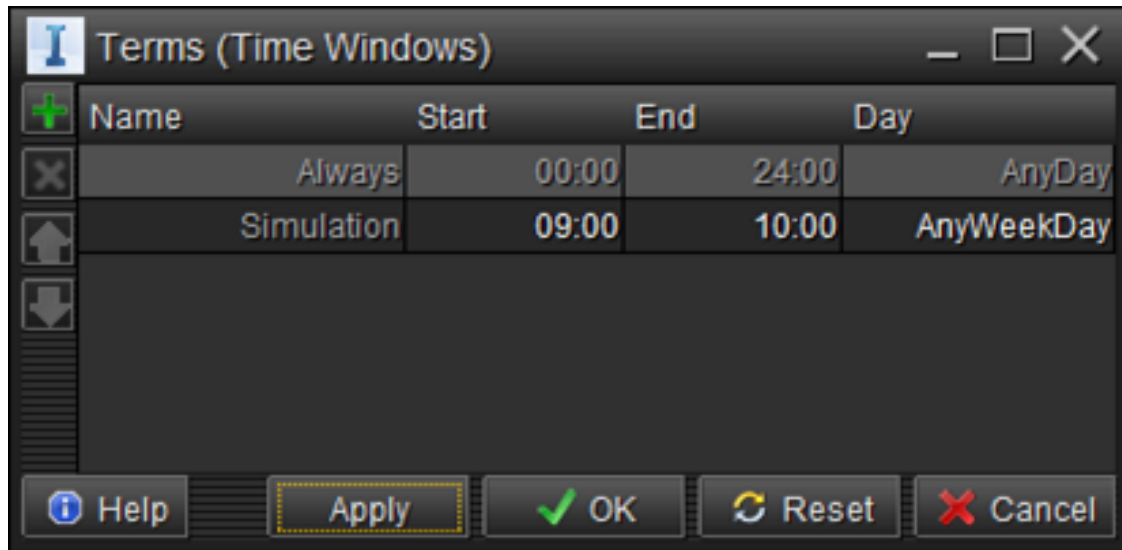
**Nota.** Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infracworks*.

**Figura 29:** *Calle de estudio.*



**Nota.** Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infracworks*.

Figura 30: Programación de horario para simulación.



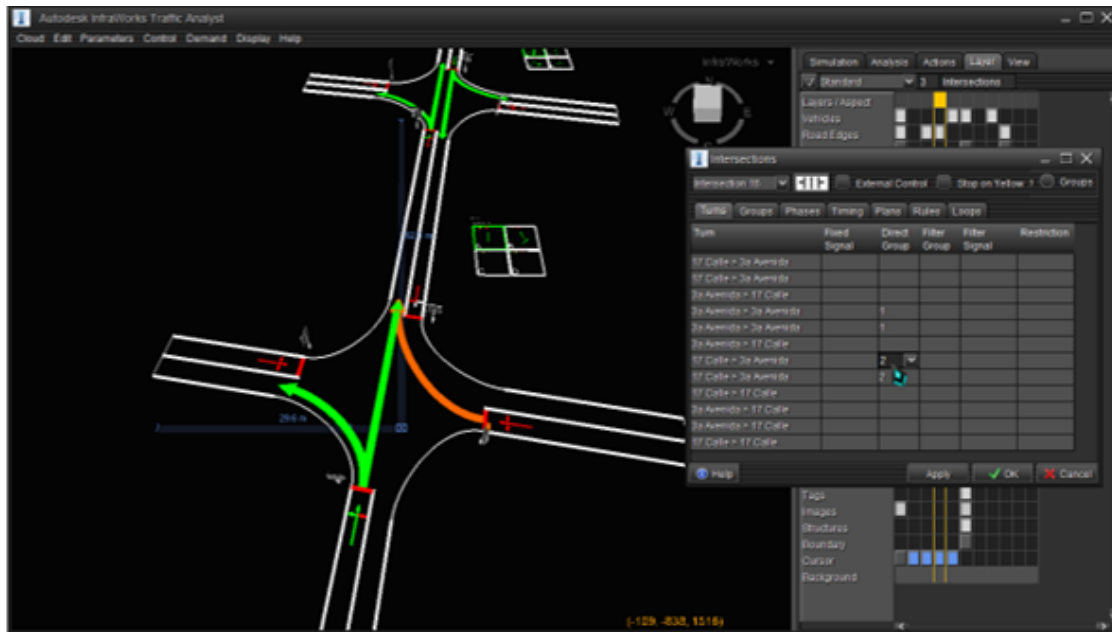
**Nota.** Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infracore*.

Figura 31: Distribución del porcentaje de tipos de automóviles.

Division	101 Small Car	102 Medium Car	103 Large Car	104 SUV	105 Van	106 Truck
Division	40.0	10.0	30.0	10.0	5.0	5.0

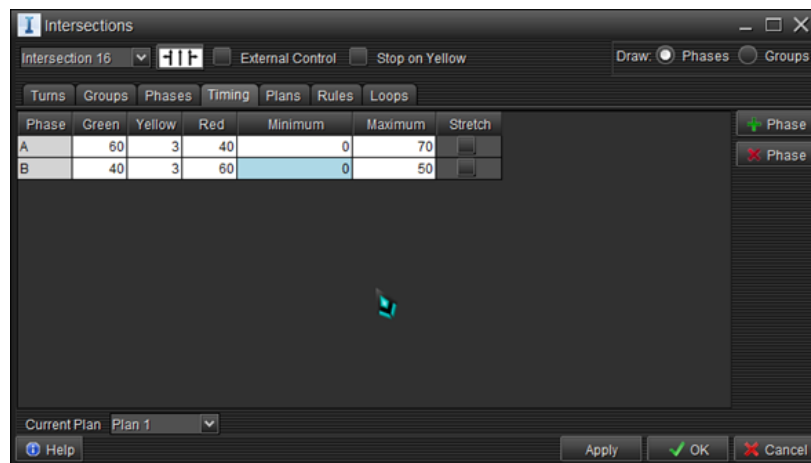
**Nota.** Captura de pantalla del simulador de tráfico de *Infracore*.

Figura 32: Simulación de una intersección típica del Centro Histórico.



Nota. Elaboración propia.

Figura 33: Programación de semáforos.



Nota. Elaboración propia.

**Figura 34:** *Modelo completo para análisis.*

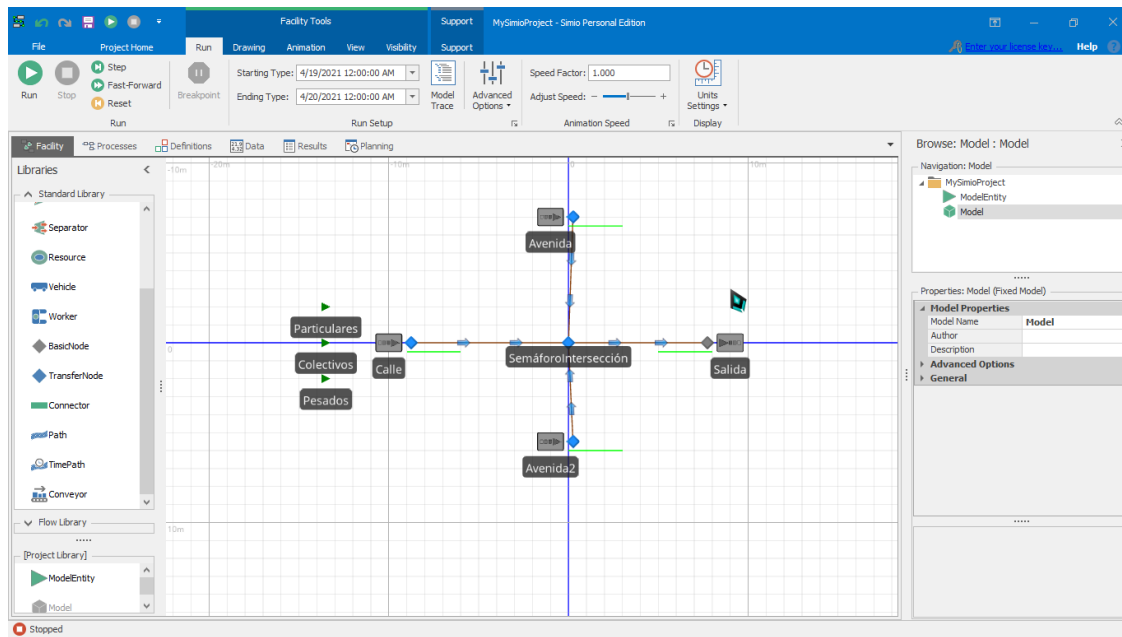
**Nota.** Elaboración propia.

Para un ejemplo más detallado de la simulación se puede referir al video:

<https://drive.google.com/file/d/11rZJaOutDPdiZVCAk9e1HcZKYgajRCWq/view?usp=sharing>  
Este es un GIF donde se muestra la simulación que se llevó a cabo para la intersección mostrada en todos los anexos, para el desarrollo preliminar de la metodología.

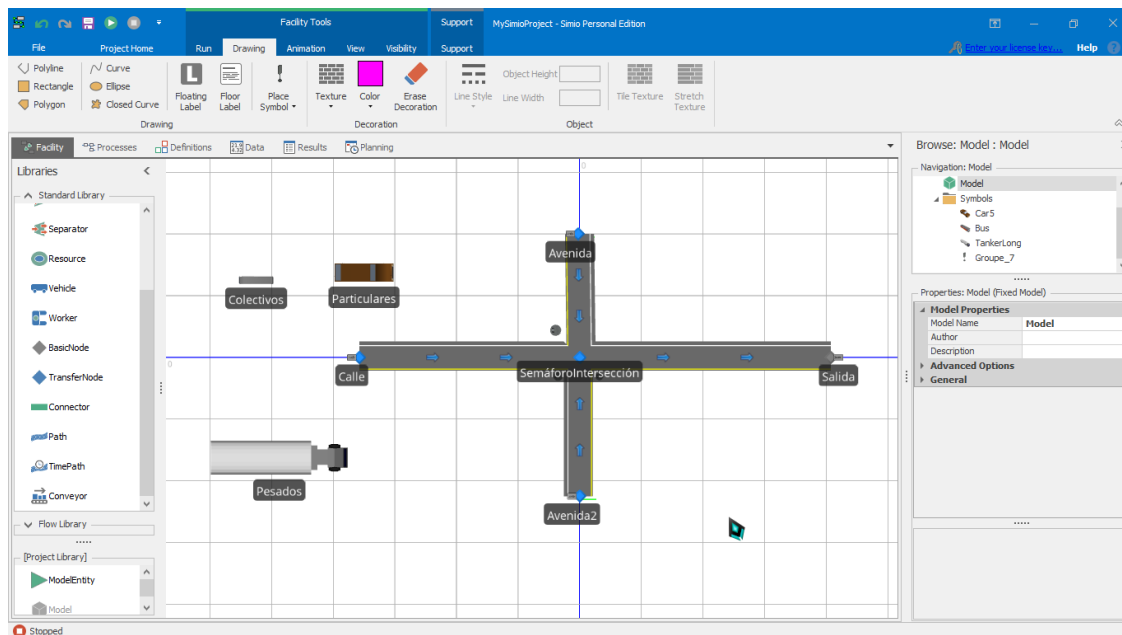
## B. Figuras del modelo de SIMIO

Figura 35: Disposición de los elementos para simulación en SIMIO.



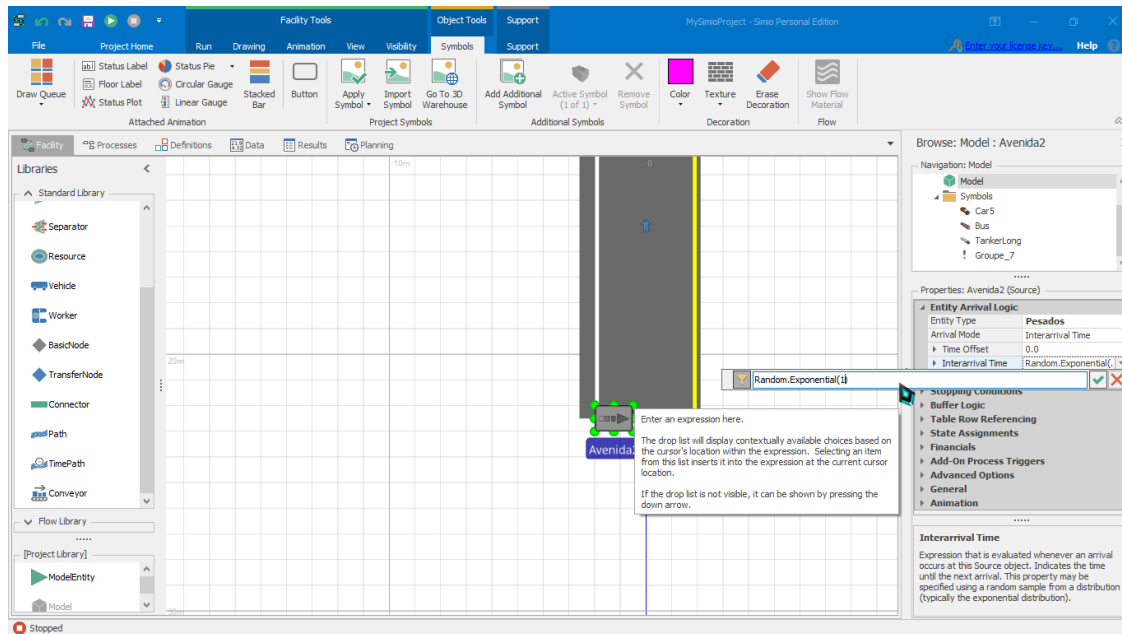
Nota. Captura de pantalla de SIMIO.

Figura 36: Disposición de los elementos para simulación en SIMIO (Modelo realista).



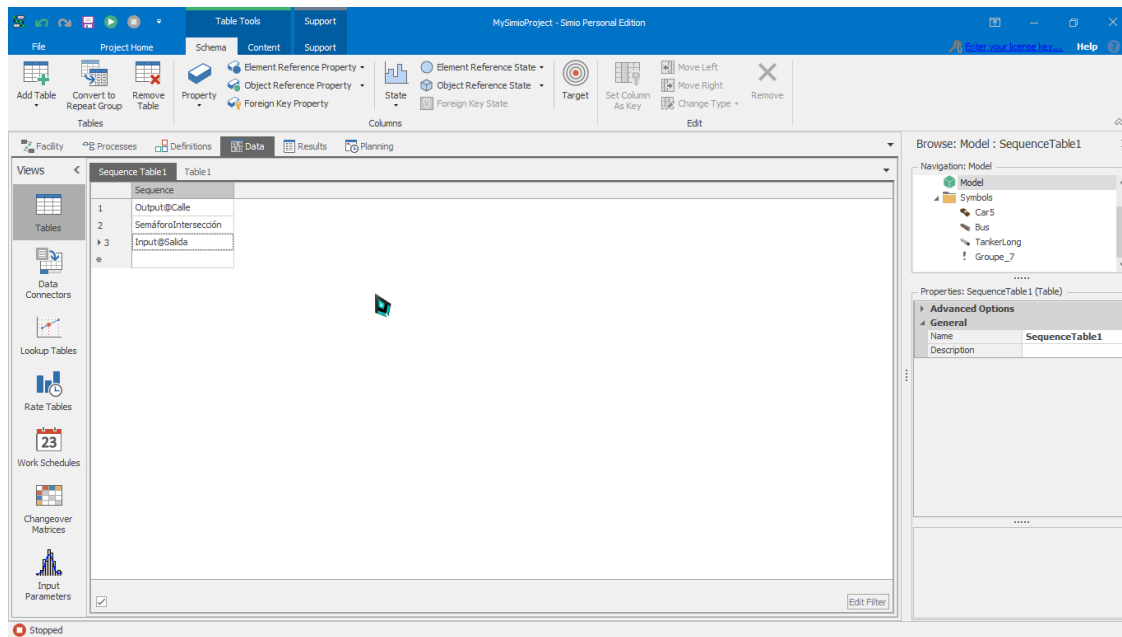
Nota. Captura de pantalla de SIMIO.

Figura 37: Elemento de recorrido o carretera.



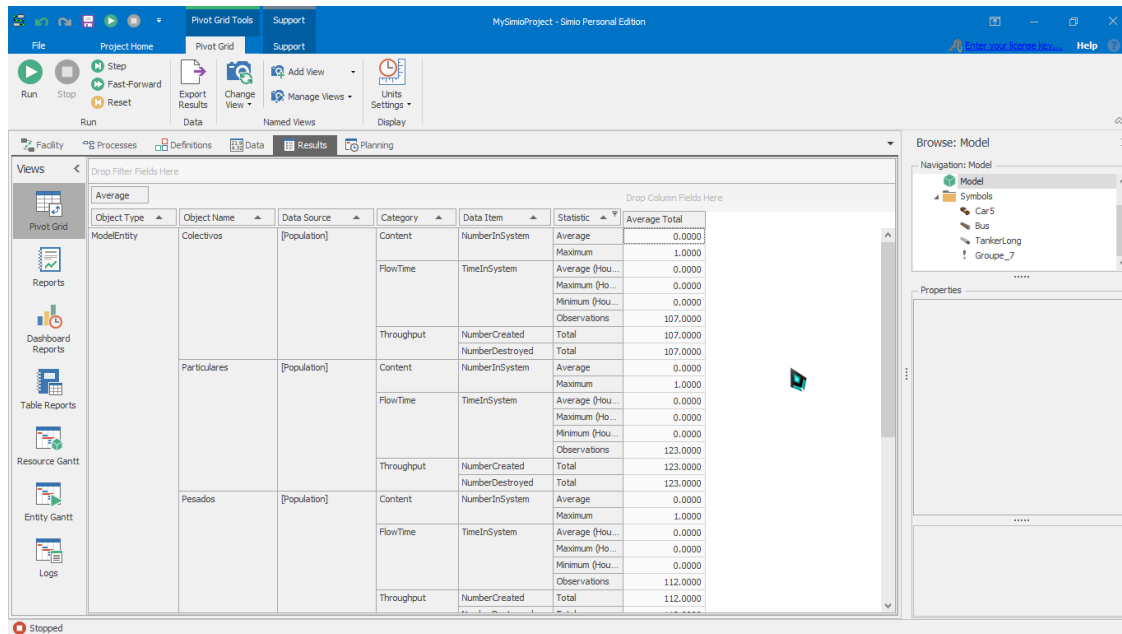
Nota. Captura de pantalla de SIMIO.

Figura 38: Ruta planificada para la intersección estudiada.



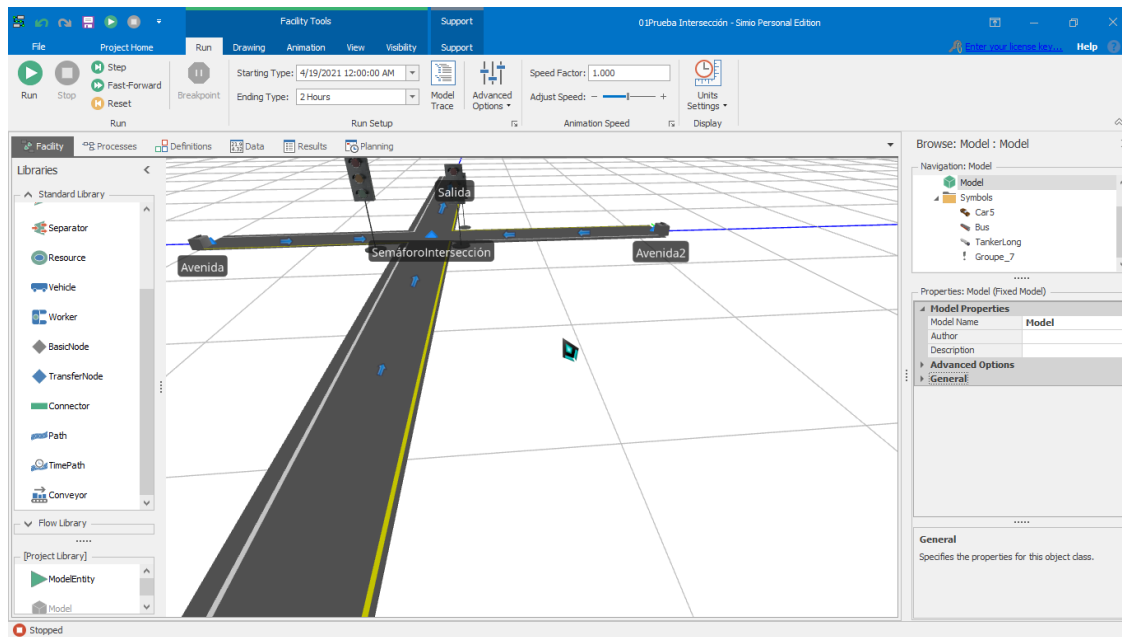
Nota. Captura de pantalla de SIMIO.

Figura 39: Resultados tras la simulación propuesta.



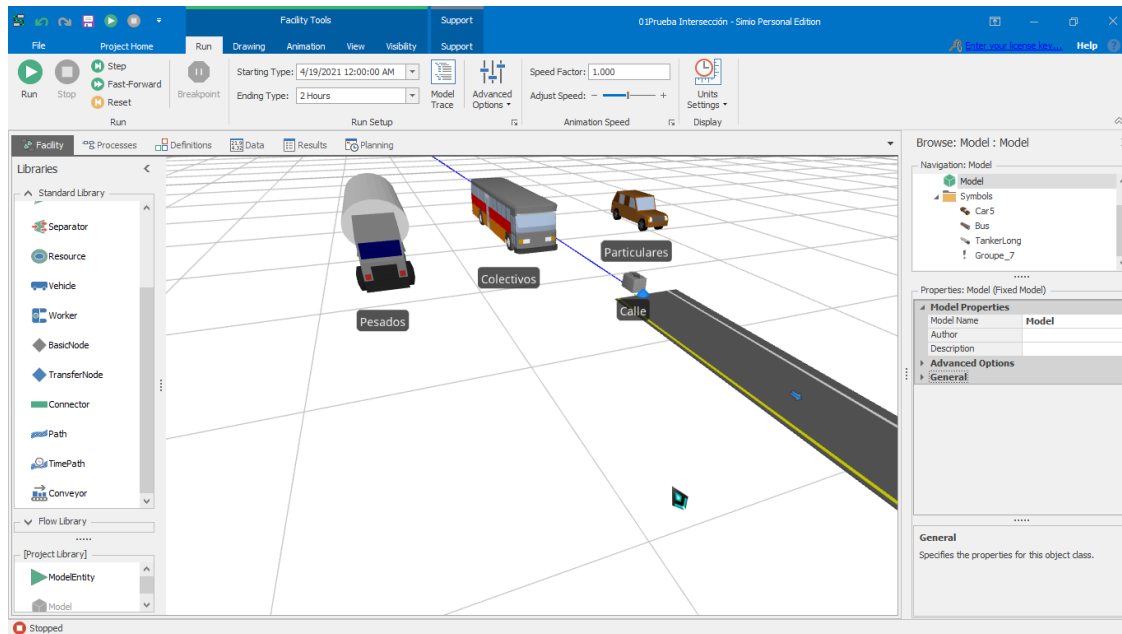
Nota. Captura de pantalla de SIMIO.

Figura 40: Vista 3D de la disposición para simular una intersección.



Nota. Captura de pantalla de SIMIO.


Figura 41: Caracterización de los tipos de transporte analizados.




Nota. Captura de pantalla de SIMIO.

C. Datos de la Municipalidad de Guatemala

Figura 42: SemafORIZACIÓN intersección 2.a avenida y 5.a calle zona 1.



**MUNICIPALIDAD DE GUATEMALA**  
**POLICIA MUNICIPAL DE TRANSITO**  
**SECRETARIA TECNICA - UNIDAD DE SEMAFOROS**  
**HOJA DE PROGRAMACION DE SEMAFOROS**



Fecha: 1-6-21 Hora:  Responsable:  Tipo de control: C-28  
 Intersección: 2 avenida y 5 calle zona 1 GPS: SI  No

Eventos y ciclos día 1

Día: L-V

Evento	Mn	Oper	Ciclo
1	0330		1
2	0900		2
3	1500		3
4	1930		4

Eventos y ciclos día 2

Día: S-O

Evento	Mn	Oper	Ciclo
1	0530		3
2	1930		5

Eventos y ciclos día 3

Día:

Evento	Mn	Oper	Ciclo

Escenarios y ciclos

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Escenario 1	80	60	70	45	45			
Escenario 2	45	40	45	35	35			
Escenario 3								
Escenario 4								
Escenario 5								
Escenario 6								
Suma	125	100	115	80	80			
Desfasamientos	01	01	01	01	01			

Fases Activas

F1 Avenida

F2 Calle

Fases

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
tiempo retraso												
tiempo destello	03	03										
tiempo ámbar	03	03										
tiempo todo rojo	01	01										
secuencia destello	A	R										

Observaciones

Nota. Fuente: Municipalidad de Guatemala.