



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**  
**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería**  
**Área Académica de Ingeniería y Arquitectura**  
**Licenciatura en Ingeniería Civil**

**Tesis para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Civil**

Propuesta vial para la reducción del congestionamiento en la  
glorieta “El Caballito” de Tulancingo, Hidalgo.

**Presenta:**

Aldama Fosado Fernando

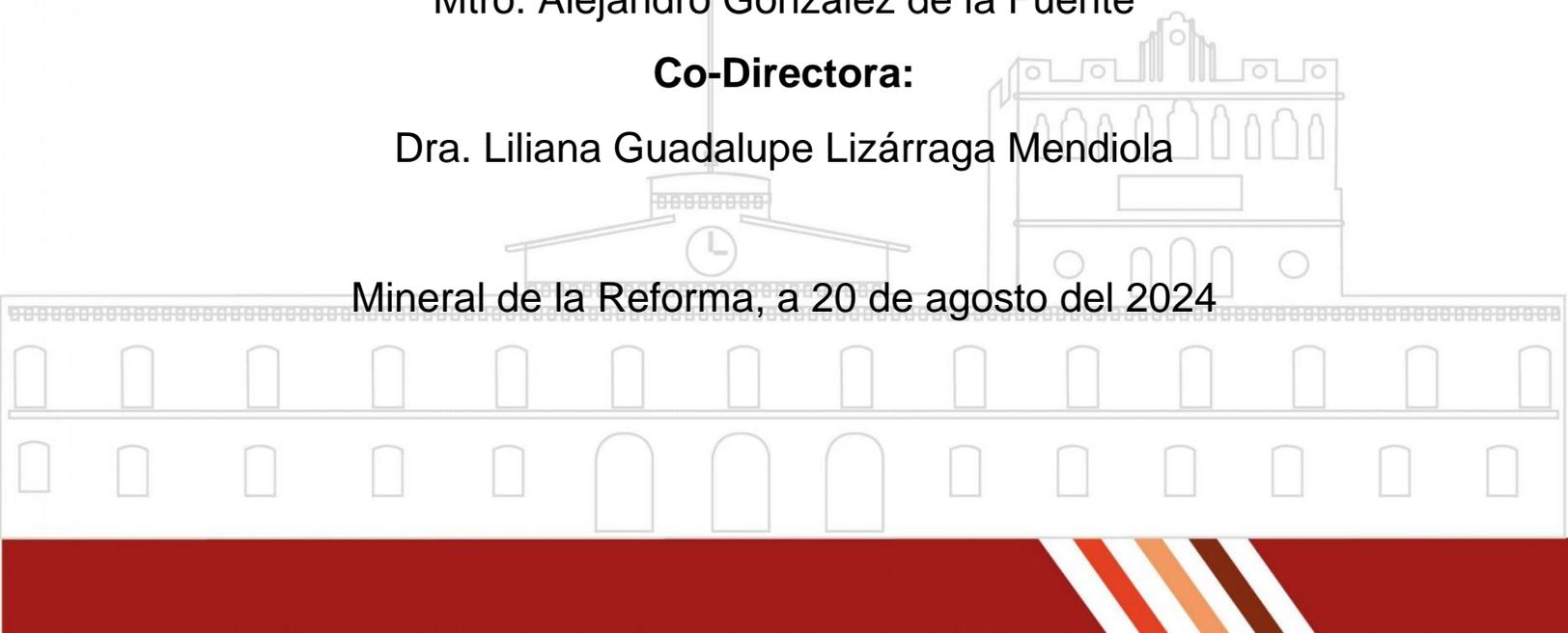
**Director:**

Mtro. Alejandro González de la Fuente

**Co-Directora:**

Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Mineral de la Reforma, a 20 de agosto del 2024





Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*School of Engineering and Basic Sciences*

Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de agosto de 2024

Número de control: ICBI-D/992/2024  
Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado al Egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Fernando Aldama Fosado**, quien presenta el trabajo de titulación "**Propuesta vial para la reducción del congestionamiento en la glorieta El Caballito de Tulancingo, Hidalgo**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

**Secretario:** Dr. Francisco Javier Olguín Coca

**Vocal:** Mtro. Alejandro González de la Fuente

**Suplente:** Mtro. Raúl López Domínguez

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

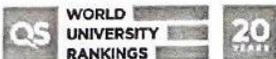
Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184  
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001  
direccion\_icbi@uaeh.edu.mx,  
vergarar@uaeh.edu.mx



## **Dedicatoria**

A mis padres, Marco Antonio Aldama Martínez y Eloina Fosado Sotomayor por ser mi ejemplo constante de esfuerzo y dedicación, por brindarme siempre su amor incondicional y apoyo en cada paso de mi vida.

Perla Michelle López Alvarado, cuya paciencia, aliento y fe en mí han sido una gran fortaleza a lo largo de este recorrido.

A mis docentes, al Mtro. Alejandro González de la Fuente y el Mtro. Raúl López Domínguez por su invaluable guía y dedicación en mi formación académica, y abrirme las puertas al fascinante mundo de la rama de ingeniería de tránsito. A la Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola por su conocimiento y dedicación e inspirarme a explorar el campo de la investigación.

A mis amigos, por su compañía, sus risas, su lealtad y su apoyo a lo largo de este camino.

# Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Capítulo 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>8</b>
1.1 Antecedentes .....	9
1.2 Problemática .....	11
1.3 Justificación .....	11
1.4 Hipótesis .....	11
1.5 Objetivos .....	11
1.5.1 Objetivo general.....	11
1.5.2 Objetivos específicos .....	11
1.5.3 Metas.....	12
1.6 Alcances y limitaciones.....	12
1.7 Recursos necesarios y disponibles.....	12
1.8 Descripción del área de estudio .....	13
<b>Capítulo 2: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
2.1 Introducción .....	15
2.2 Tipos de intersecciones .....	15
2.2.1 Intersecciones a nivel .....	16
2.2.2 Intersecciones a desnivel .....	18
2.3 Criterios para diseñar una intersección.....	18
2.3.1 Velocidades .....	19
2.3.2 Señalamiento vertical.....	19
2.3.3 Señalamiento horizontal .....	21
2.3.4 Volumen de tránsito .....	22
2.3.5 Aforos vehiculares.....	23
2.3.6 Nivel de servicio.....	25
2.3.7 Niveles de servicio SCT .....	27
2.3.8 Semaforización .....	28
2.3.9 Metodología Webster.....	31
2.4 Criterios en el diseño de glorietas.....	34
2.4.1 Trazado de la isleta central de una glorieta .....	35
2.4.2 Sobreelevaciones .....	37

2.4.3 Guarniciones y acotamientos .....	37
2.5 Simuladores de tránsito .....	38
2.5.1 Definición .....	38
2.5.2 Softwares de simulación.....	39
2.5.3 Casos de estudio con PTV Vissim.....	40
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA .....</b>	<b>41</b>
3.1 Introducción .....	42
3.2 Realización de aforos vehiculares .....	42
3.3 Estado actual de la intersección.....	52
3.4 Propuesta 1: Implementación de semáforos.....	57
3.5 Propuesta 2: Modificación geométrica .....	63
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>65</b>
4.1 Resultados de la simulación .....	66
4.2 Discusión.....	75
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN .....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>81</b>

## Resumen

El objetivo de este proyecto de investigación es proponer escenarios para la posible disminución de la congestión vehicular que ocurre en horas pico en una intersección “tipo glorieta” ubicada en el Boulevard Emiliano Zapata en la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, México.

Para analizar la situación actual y los escenarios propuestos se hizo uso del software de simulación de tránsito PTV Vissim, el cual, ayudará a tomar la decisión final sobre cual caso es el más favorable permitiendo un mejor flujo vehicular, para ello se necesitó procesar los datos obtenidos en aforos vehiculares en las horas pico.

Los escenarios que se analizarán son: El estado actual de la intersección, implementación de semáforos y modificar geoméricamente la intersección.

**Palabras clave:** Tránsito, Vissim, intersección, simulación, glorieta.

## Abstract

The objective of this research project is to propose scenarios for the possible reduction of traffic congestion that occurs during peak hours at a "roundabout-type" intersection located on Emiliano Zapata Boulevard in the city of Tulancingo, Hidalgo, Mexico.

To analyze the current situation and the proposed scenarios, the PTV Vissim traffic simulation software was used, which will help in making the final decision on which case is the most favorable for allowing better traffic flow. For this, it was necessary to process the data obtained from traffic counts during peak hours.

The scenarios to be analyzed are: the current behavior of the intersection, the implementation of traffic lights, and geometric modifications to the intersection.

**Keywords:** Traffic, Vissim, intersection, simulation, roundabout.

# Capítulo 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Antecedentes

La ingeniería de tránsito es una rama de la ingeniería que estudia las características elementales del tránsito vehicular (peatón, conductor, vía, vehículo y medio ambiente) así como las relaciones entre estos (Radelat, 2003).

Uno de los elementos básicos del tránsito son los vehículos, que han pasado de ser objetos de “lujo” a una necesidad para transportarse. Desde finales de la década de los 30’s a nivel mundial ha incrementado el número de personas que cuentan con vehículos como se muestra en la **tabla 1**, esta cifra va en aumento (Cal y Mayor, 2018).

**Tabla 1:** Evolución del número de vehículos en el mundo (Cal y Mayor, 2018; Hernández, 2023)

Año	Número de vehículos en el mundo
1939	44,629,284
1950	63,242,895
1960	121,541,265
1975	320,841,457
1989	406,270,808
1997	509,130,000
2000	562,100,000
2010	776,140,000
2014	907,051,000
2023	1,474,000,050

El caso de México no es la excepción, ya que el parque vehicular se ha visto en aumento a través de los años como se muestra en la **tabla 2** donde, en comparación de la tabla anterior, para el año 2014 México representaba aproximadamente el 5.86% de vehículos en el mundo (INEGI, 2021).

**Tabla 2:** Total nacional de vehículos (INEGI, 2021)

<b>Año</b>	<b>Número de vehículos en México</b>
1980	5,758,330
1990	9,862,108
2000	15,611,916
2010	31,635,012
2014	38,027,171
2020	51,215,678
2021	53,115,396

En el caso de la ciudad de Tulancingo no existen datos precisos sobre el número de vehículos que hay a la fecha, sin embargo, tomando en cuenta que para 2014 en el estado de Hidalgo había 344 autos por cada 1000 habitantes (Luna, 2016) y tomando en cuenta la población de Tulancingo que es de 168,369 habitantes al 2020 (INEGI, 2020) se tiene un parque vehicular aproximado de 57,919 automóviles.

Tulancingo cuenta con una intersección de tipo rotonda en el boulevard Emiliano Zapata, sin embargo, esta no cumple del todo con su funcionalidad y genera problemas como la congestión vehicular. Pese a este problema, las autoridades han presentado posibles soluciones o alternativas, por ejemplo, años atrás había semáforos en esta intersección, pero fueron retirados debido a que hubo quejas por parte de la población al llamarlos “innecesarios”. Dentro de los conflictos más comunes que se generan en el sitio son: Atascos, accidentes vehiculares, demoras los tiempos de viaje.

La ingeniería de tránsito es importante para el desarrollo del sistema vial, debido al aumento en la cantidad de vehículos, la congestión que se puede generar y los accidentes que ocurren en un sitio (González, 2020). Es por eso que el objetivo de este estudio será realizar una propuesta que ayude a reducir los conflictos mencionados anteriormente.

## 1.2 Problemática

En la ciudad de Tulancingo Hidalgo existe una rotonda que genera atascos y problemas de congestión vehicular, esto quizá por un mal diseño o el hecho de que no se tenía contemplado un alto flujo vehicular a futuro.

El problema es ocasionado debido a que los vehículos que desean retornar o incorporarse a la carretera no lo pueden hacer de manera segura, al no haber una sincronización se ocasionan atascos e incluso accidentes vehiculares. Los cuales traen como consecuencia largas filas de espera y demoras a los usuarios.

## 1.3 Justificación

Para llevar a cabo esta investigación se demostrará, por medio de simuladores de tránsito, el comportamiento del flujo vehicular tras realizar modificaciones a la intersección.

Los motivos serán disminuir la congestión vehicular, lo cual implica demoras para los usuarios, además de los accidentes que pueden ocurrir por los conductores que transitan por el boulevard.

## 1.4 Hipótesis

Es posible, mediante un diseño por simulador, proponer una modificación de la situación actual de la intersección vial, que permita una reducción en la congestión de tránsito.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Analizar la glorieta ubicada en el boulevard Emiliano Zapata mediante un estudio de tránsito y simulaciones con software para buscar posibles escenarios que permitan mejorar el flujo vehicular y los tiempos de viaje.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Obtener los datos del comportamiento de tránsito en la zona mediante aforos vehiculares para obtener los volúmenes de tránsito.
- Definir los posibles casos de solución para posteriormente realizar las simulaciones de los mismos.

- Realizar las simulaciones de los distintos escenarios con el uso del software PTV Vissim 2024 para conocer cómo se comporta cada uno de ellos.
- Analizar los resultados e identificar cual es el escenario más favorable.

### 1.5.3 Metas

- Obtener una muestra de los volúmenes de tránsito en la zona.
- Proponer con base en los flujos de tránsito posibles soluciones para evitar el congestionamiento vial.
- Analizar los resultados de cada simulación.
- Tomar la decisión final sobre cual modificación es la más viable.

## 1.6 Alcances y limitaciones

### **Alcances:**

- Se podrá realizar un aforo vehicular de manera presencial en sitio de estudio.
- Se podrán realizar las simulaciones con el software necesario.
- Los datos obtenidos serán actuales.

### **Limitaciones:**

- Se podrá visitar pocas veces el sitio de estudio.
- El software a utilizar se verá limitado al ser una versión académica.
- Muestra limitada del volumen vehicular.

## 1.7 Recursos necesarios y disponibles

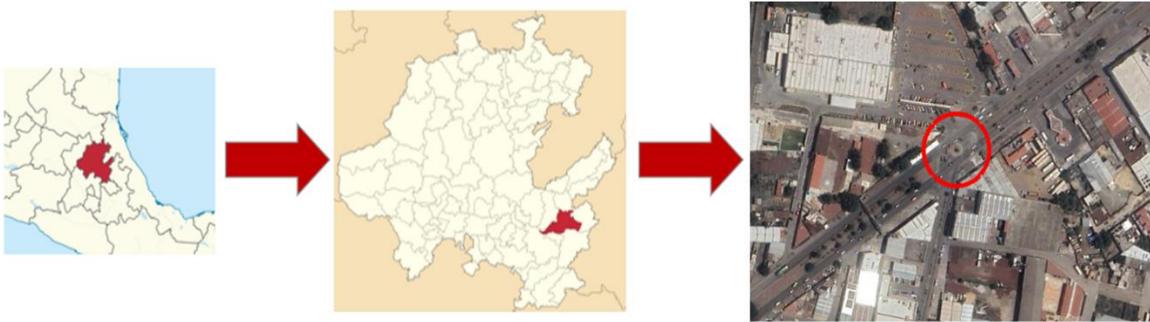
Para llevar a cabo el proyecto será necesario realizar estudios de campo para obtener volúmenes de tránsito en las horas pico del sitio de estudio, así como normativas y manuales de diseño para poder establecer los posibles casos de solución y el uso softwares, Google Earth para analizar la zona y uno que sea capaz de realizar simulaciones de tráfico como lo es PTV Vissim 2024 en su versión académica.

### 1.8 Descripción del área de estudio

El sitio a estudiar se encuentra ubicado en el municipio de Tulancingo de Bravo, estado de Hidalgo. Dicho municipio cuenta con una población de 3,082,841 habitantes al censo más reciente y un clima templado subhúmedo con una temperatura anual media de aproximadamente 16°C con lluvias en el verano (INEGI, 2020) .

La intersección se ubica entre el boulevard Emiliano Zapata y la avenida 21 de marzo con coordenadas 20°05'40.44''N y 98°21'46.60''W como se muestra en la **imagen 1**. El boulevard cuenta con dos carriles por lado con un camellón en la parte media.

Algunos puntos de referencia son un Aurrerá, un Oxxo, una sucursal de Elektra y el más representativo, el monumento a Emiliano Zapata.



**Imagen 1:** Ubicación del sitio (Fuente: Elaboración propia).

## Capítulo 2: MARCO TEÓRICO

## 2.1 Introducción

La congestión vehicular es un problema común en las principales áreas urbanas del mundo que afecta la red vial, es causada por el incremento de la población, su parque vehicular, inexistencia de señalamientos o vías alternas (Verdezoto, 2020).

Tal es el caso de la Avenida Pedro Méndez Gilbert en Guayaquil, Ecuador. Esta avenida tenía congestionamiento vehicular pese a su capacidad de 9000 veh/h. La solución consistió en que se actualizaron y ajustaron los sistemas de semáforos y se implementó una vía alterna de salida (Verdezoto, 2020).

A nivel nacional, una de las ciudades con mayores problemas de congestionamiento vial es la Ciudad de México, donde los automovilistas pierden alrededor de 152 horas al año en el tráfico; el peor día registrado fue el 7 de diciembre de 2023 con un promedio de 35 minutos para recorrer una distancia de 10 kilómetros, la avenida con mayor congestionamiento fue el Viaducto Miguel Alemán (Zamarrón, 2024).

Otro ejemplo es un nodo que se ocasiona en el boulevard Minero en la ciudad de Pachuca de Soto, en el cual se detectó que en horas pico el nivel de servicio baja a un nivel B, las soluciones propuestas fueron aumentar la unificación del tramo de entrecruzamiento considerando la reprogramación de los semáforos (IMIP, 2012).

## 2.2 Tipos de intersecciones

Para la ingeniería de tránsito, una intersección vial se refiere a la parte de la infraestructura en la cual hay un cruce de dos o más caminos los cuales pueden ser al mismo nivel o a un desnivel (Cuéllar & Beltrán, 2020). A continuación, se explica de manera más detallada estos dos tipos:

### 2.2.1 Intersecciones a nivel

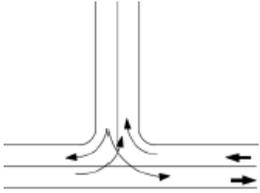
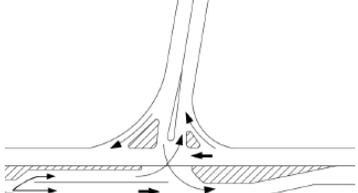
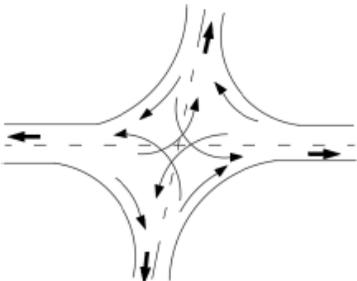
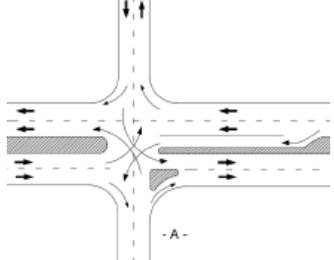
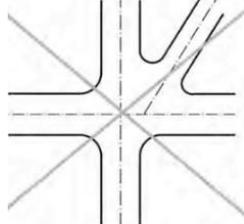
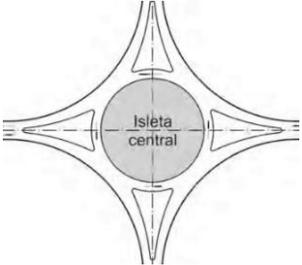
Son aquellas donde todos los caminos que cruzan se encuentran en un mismo nivel de carretera, además de que requieren de algún control para que su operación sea de manera segura mediante señalamientos o incluso semáforos (Mendoza, 2015).

Un tipo de intersección que, en algunos casos, ayuda a mejorar el flujo de automóviles es la glorieta, esto debido a que los vehículos de la parte interna no deben detenerse o ceder el paso a otros automóviles, además de que no se permite estacionarse en el carril de extremo y en algunos casos impide el paso de peatones, es por eso que se obtiene un flujo libre para los vehículos favoreciendo el descongestionamiento en la vía (Rodríguez, 2015).

El uso de glorietas no está exento de tener problemas, ya que se deben seguir ciertas reglas para cruzar: Evitar detenerse y/o estacionarse, evitar circular siempre por el carril exterior y ceder el paso a quienes están dentro de la glorieta. Un mal uso de estas puede ocasionar choques de vehículos, los cuales ocurren al querer entrar o salir de la glorieta, lo cual deriva en un inminente retraso al flujo de vehículos formando largas filas de estos (S.M., 2023).

La **Tabla 3** muestra las intersecciones a nivel más comunes:

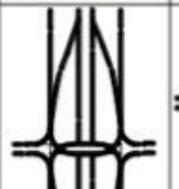
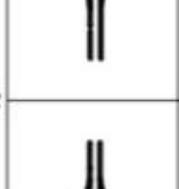
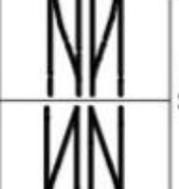
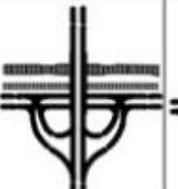
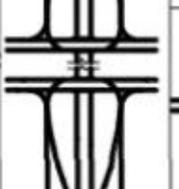
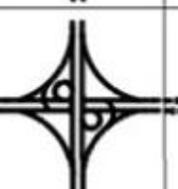
**Tabla 3: Ejemplos de intersecciones a nivel (SCT,2018).**

Núm. ramas	Nombre	Diseño
3	"T" o "Y" simple	
	"T" o "Y" canalizada	
4	Cuatro ramas simples	
	Cuatro ramas canalizadas	
≥ 4	De ramas múltiples	
	Glorieta	

### 2.2.2 Intersecciones a desnivel

Esta solución es aplicable para dos o más caminos que se encuentran en distintos niveles para que los conductores puedan realizar los cambios de trayectoria necesarios con un mínimo de puntos de conflicto (Leython, 2022). La **imagen 2** muestra ejemplos de este tipo de intersecciones, que se pueden clasificar en:

- Intersecciones de 3 ramas (“T” o “Y”)
- Intersección de 4 o más ramas
- Intersecciones rotatorias

DE CUATROS RAMAS				DE TRES RAMAS	
DE LIBRE CIRCULACIÓN		CON CONDICIÓN PARADA		DIRECCIONALES	TROMPETAS
OTROS	TRÉBOL COMPLETO	DIAMANTES	TRÉBOL PARCIAL		
					
					
					

**Imagen 2:** Intersecciones a desnivel (Vías PUCP, 2022).

### 2.3 Criterios para diseñar una intersección

Para diseñar una intersección vial o conocer su comportamiento es necesario conocer ciertos parámetros y datos que afectarán en el comportamiento de la misma, estos pueden ser, por ejemplo, las velocidades máximas y mínimas del camino, la capacidad vial, los volúmenes de tránsito, entre otros aspectos que serán descritos a continuación (Uribe, 2009).

### 2.3.1 Velocidades

Los vehículos que transitan por una vialidad deben seguir y respetar los límites de velocidad que se establecen por la “Ley general de movilidad y seguridad vial” los cuales, según el artículo 49 fracción III, establecen las siguientes velocidades a nivel federal (Secretaría de Servicios Parlamentarios, 2022):

- i. Para calles secundarias y terciarias: 30 km/h
- ii. Avenidas primarias sin acceso controlado: 50 km/h
- iii. Avenidas de acceso controlado: 80 km/h
- iv. Carreteras estatales: 80 km/h
- v. Autopistas: 110 km/h (Automóviles), 95 km/h (Autobuses), 80 km/h (Transporte de bienes y mercancías)
- vi. Intersecciones: 50 km/h

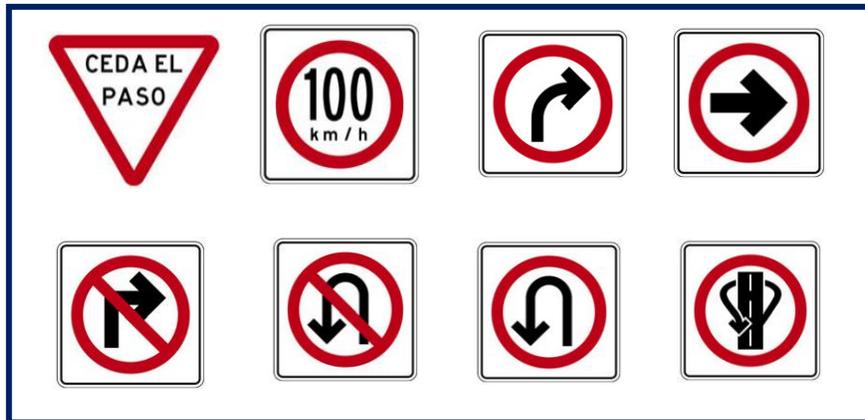
Con excepción de las zonas escolares, el artículo 62 del reglamento de movilidad y transporte del municipio de Tulancingo menciona que el límite de velocidad en la ciudad es de 30 km/h (Reglamento de movilidad y transporte, 2020).

### 2.3.2 Señalamiento vertical

Para advertir a los conductores que se aproxima algún cruce, intersección, semáforo entre otros, será necesario la implementación de señalamiento principalmente vertical, este señalamiento es el conjunto de postes fijos que incluyen un tablero con un pictograma cuyo propósito es, prevenir, restringir o brindar algún tipo de información al conductor de manera clara y concisa (SCT, 2023).

**Señalamiento restrictivo:** Algunos ejemplos se muestran en la **imagen 3**.

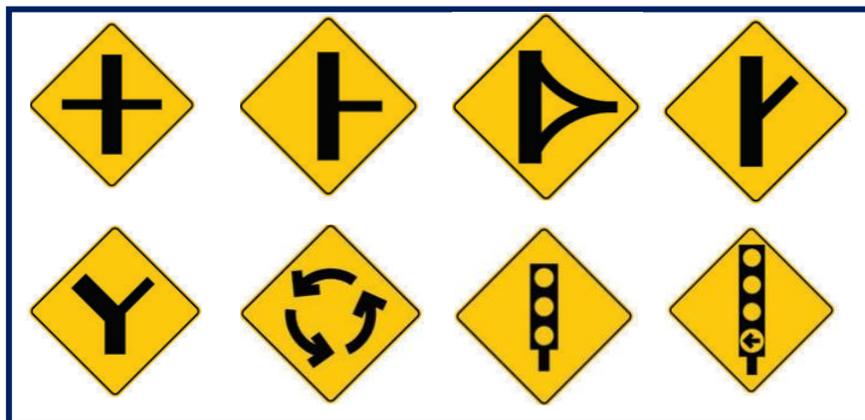
- SR-7: Ceda el paso
- SR-9: Velocidad
- SR-10: Vuelta continua a la derecha
- SR-11: Circulación en intersecciones
- SR-23 y 24: Prohibido vuelta
- SR-25: Prohibido retorno
- SR-25A (B, C): Retorno permitido



**Imagen 3:** Señalamiento restrictivo en intersecciones (SCT,2023).

**Señalamiento preventivo:** Se muestran ejemplos en la **imagen 4**.

- SP-11: Intersección a nivel
- SP-12: Intersección en “T”
- SP-13: Intersección en Delta
- SP-14: Intersección en oblicua
- SP-15: Intersección en “Y”
- SP-16: Glorieta
- SP-37: Semáforo
- SP-49: Vuelta a la izquierda con semáforo



**Imagen 4:** Señalamiento preventivo en intersecciones (SCT,2023).

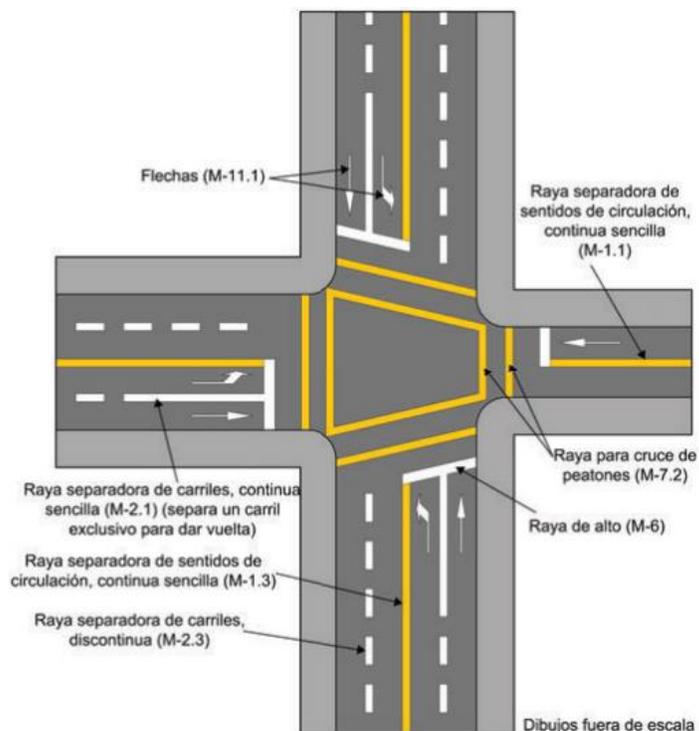
### 2.3.3 Señalamiento horizontal

Se le conoce como señalamiento horizontal a todo el conjunto de marcas y/o dispositivos que van pintados o colocados en el pavimento cuyo propósito es delinear las características geométricas de los caminos (SCT, 2023).

Para las intersecciones el “Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad” propone colocar los siguientes señalamientos según sea el caso:

- **M-1.:** Raya separadora de sentidos de circulación
- **M-2:** Raya separadora de carriles
- **M-3:** Raya en la orilla del arroyo vial
- **M-4:** Raya guía en zonas de transición
- **M-5:** Rayas canalizadoras
- **M-6:** Raya de alto
- **M-7:** Rayas para cruce de peatones o de ciclistas
- **M-11:** Rayas, símbolos y leyendas para regular el uso de carriles

Este señalamiento se puede emplear, por ejemplo, como en la **imagen 5**:



**Imagen 5:** Señalamiento horizontal en intersecciones (SCT,2023).

#### 2.3.4 Volumen de tránsito

En el campo de la ingeniería de tránsito, el volumen (Q) es una medición básica que se debe realizar para obtener el número de peatones, ciclistas o vehículos que pasan en un punto determinado en un periodo concreto (Cal y Mayor, 2018).

- **Tasa de flujo (q):** Frecuencia con la que transitan los vehículos en un lapso de tiempo específico.
- **Demanda (D):** Es la cantidad de autos que desean pasar por un punto determinado en un tiempo específico.
- **Capacidad (c):** Es el número máximo de automóviles que pueden pasar por un lugar determinado en un periodo concreto.

#### **Volúmenes de tránsito absolutos o totales:**

Se pueden definir como el número de automóviles que durante un lapso de tiempo transitarán en una zona, según la duración pueden existir los siguientes volúmenes absolutos o totales (Córdoba, 2014):

- Tránsito anual (TA): Vehículos que pasan en 1 año.
- Tránsito mensual (TM): Vehículos que pasan en 1 mes.
- Tránsito semanal (TS): Vehículos que pasan en 1 semana.
- Tránsito diario (TD): Vehículos que pasan en 1 día.
- Tránsito horario (TH): Vehículos que pasan en 1 hora.
- Tasa de flujo (q): Vehículos que pasan en 1 hora.

#### **Volumen horario de máxima demanda (VHMD):**

Se refiere a la cantidad máxima de vehículos que transitan por la vía en una hora consecutiva, representa la máxima demanda que puede tener una vía en un día en particular (Cal y Mayor, 2018).

Por lo cual la ecuación (2.1) establece lo siguiente (Cal y Mayor, 2018):

$$FHMD = \frac{VHDM}{N(Q_{t\ max})}$$

**Donde:**

FHMD= Factor horario de máxima demanda

VHMD= Volumen horario de máxima demanda (veh/hora)

N= Número de periodos durante la hora de máxima demanda

t= Duración del periodo (min)

**2.3.5 Aforos vehiculares**

Para conocer la cantidad de vehículos que pasan por una vía es necesario realizar un aforo o conteo para conocer el comportamiento que tiene el flujo vehicular en el sitio a estudiar, hay dos métodos generales que son empleados para realizar los conteos (SCT, 2016):

- **Aforos manuales:** Es realizado de forma visual y tiene una duración de pocas horas, es empleado cuando no se tiene a la disposición equipos automáticos de medición y se realiza mediante el llenado manual de un formulario donde se pueden clasificar los tipos de vehículos, carril de ocupación, dirección que tienen, ente otros.
- **Aforos automáticos:** Es un método donde se recopilan datos mediante el uso de dispositivos que permiten registrar de manera continua el comportamiento del flujo de tránsito en una vialidad en un tiempo establecido.

**Clasificación de vehículos:**

Para realizar un aforo vehicular es necesario conocer como están clasificados los vehículos como lo muestra la **tabla 4** según la NOM-012-SCT-2-2014 (DOF, 2014):

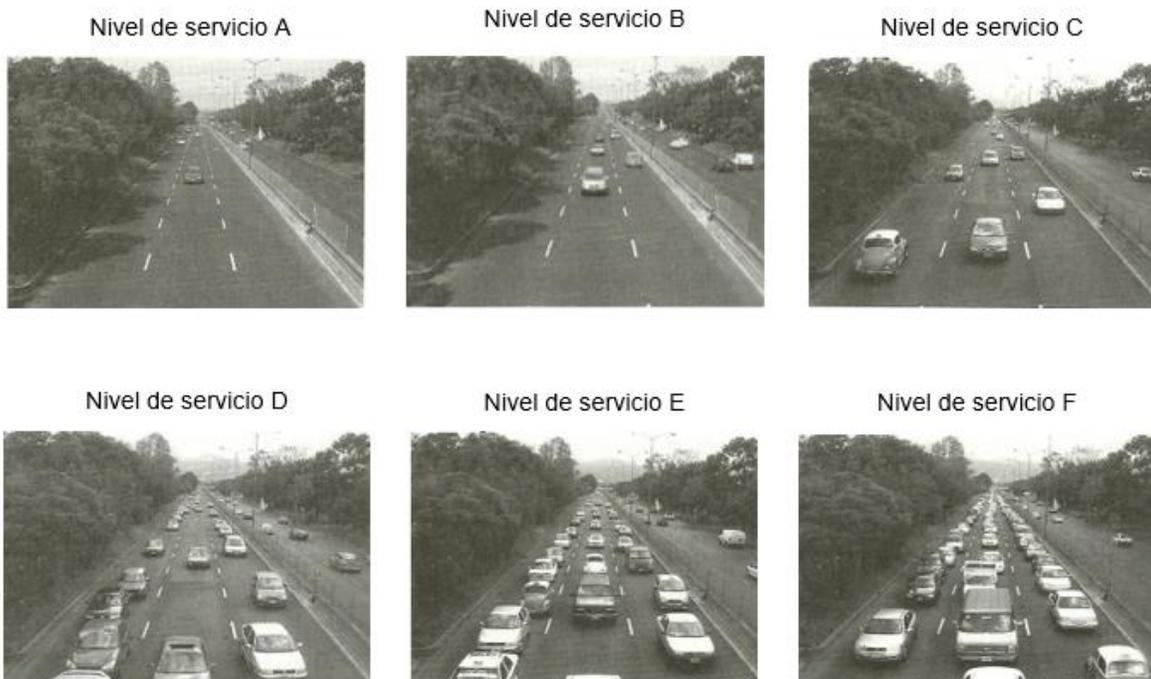
Tabla 4: Clasificación de los vehículos (SCT,2014)		
Nomenclatura	Vehículo	Descripción
A2	Automóvil	Automóvil
A'2		Camión ligero con capacidad de carga de hasta 3 Ton.
B2	Autobús	Autobús de dos ejes
B3		Autobús de tres ejes

B4		Autobús de cuatro ejes
C2	Camión unitario	Camión de dos ejes
C3		Camión de tres ejes
C4		Camión de cuatro ejes
C2-R2		Camión de dos ejes con remolque de dos ejes
C3-R2	Camión-Remolque	Camión de tres ejes con remolque de dos ejes
C2-R3		Camión de dos ejes con remolque de tres ejes
C3-R3		Camión de tres ejes con remolque de tres ejes
T2-S1		Tractocamión Articulado
T2-S2	Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes	
T2-S3	Tractor de dos ejes con semirremolque de tres ejes	
T3-S2	Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes	
T3-S3	Tractor de tres ejes con semirremolque de tres ejes	
T2-S1-R2	Tractocamión Semirremolque-Remolque	
T2-S2-R2		Tractor de dos ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes
T3-S1-R2		Tractor de tres ejes con semirremolque de un eje y remolque de dos ejes

T3-S2-R2		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de dos ejes
T3-S2-R3		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de tres ejes
T3-S2-R4		Tractor de tres ejes con semirremolque de dos ejes y remolque de cuatro ejes

### 2.3.6 Nivel de servicio

Se le conoce así a la medida cualitativa que ofrece una vialidad, en cuanto a sus condiciones de operación, a los usuarios y se establece en seis niveles de servicio (A, B, C, D, E y F) que van de manera decreciente para una circulación continua, es decir, que no se detenga debido a intersecciones o semáforos (Jerez, 2015). En la **imagen 6** se muestra como es el comportamiento de los niveles de servicio en un camino.



**Imagen 6:** Niveles de servicio (UNAM, 2011).

### Condiciones prevalectentes:

Existen factores que pueden causar modificaciones en los niveles de servicio de un camino, estos se pueden clasificar en las siguientes cuatro categorías (Mozo, 2011):

1. **Condiciones de infraestructura vial:** Las capacidades físicas de la vialidad, su geometría y el tipo de terreno en que se encuentra el camino.
2. **Condiciones del tránsito:** Se refiere a como está compuesto el tránsito en el camino (Distribución de carriles y tipo de vehículos).
3. **Condiciones de los controles:** Aquí se hace referencia a la señalización, velocidades límite y semáforos, es decir, los dispositivos de control del tránsito.
4. **Condiciones ideales:** Es la condición óptima, asociadas al buen clima, un buen pavimento, conductores familiarizados con el flujo vial y que no haya impedimentos en los flujos vehiculares

### Nivel de servicio en intersecciones:

Los niveles de servicio en las intersecciones de doble vía con parada controlada son determinadas por el cálculo o el control medido de demora, en el caso de los automóviles se determina para cada movimiento a calles secundarias y a giros a izquierda en las calles principales con base a los criterios que se muestran en la **tabla 5** (HCM, 2010).

Tabla 5: Niveles de servicio en intersecciones		
Control de demora (s/vehículo)	Relación volumen-capacidad	
	$v/c \leq 1$	$v/c > 1$
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

Se le asigna “F” si la relación volumen-capacidad para el movimiento sobrepasa 1.0 independientemente del control de la demora.

**Datos requeridos para el análisis de intersecciones (HCM, 2010):**

1. Número y configuración de carriles en cada acceso
2. Porcentaje de vehículos pesados para cada movimiento
3. Cualquiera de lo siguiente:
  - a. Tasa de flujo de demanda para cada movimiento de entrada de vehículos y cada movimiento de cruce de peatones durante el pico de 15 min.
  - b. Tasa de flujo de demanda para cada movimiento vehicular entrante y cada movimiento de cruce de peatones durante la hora pico y factor de hora pico para la hora.
4. Factores geométricos especiales como, por ejemplo:
  - a. Aspectos únicos de canalización.
  - b. Existencia de un carril de doble sentido para girar a la izquierda o mediana elevada o rayada almacenamiento (o ambos).
  - c. Grados de aproximación.
  - d. Existencia de accesos ensanchados en la calle secundaria.
  - e. Existencia de señales elevadas.
5. La velocidad a la que los automovilistas ceden el paso a los peatones.
6. Duración del período de análisis, generalmente un período pico de 15 minutos dentro de la hora pico.

**2.3.7 Niveles de servicio SCT**

La Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) ha otorgado niveles de calidad a los principales tramos carreteros de todo el país. La **tabla 6** muestra la clasificación del tramo a estudiar y a continuación se mencionan los datos que fueron son tomados (SCT, 2021):

- Límites de cada tramo
- Cadenamiento final del tramo
- Volumen vehicular, expresado en volumen horario máximo (V.H.)

- Porcentaje de vehículos pesados (B= Autobuses, Cam= Camiones)
- Tipo de terreno: Plano (P), Lomerío (L) y Montañoso (M)
- Número de carriles en el tramo (#C)
- Límites de los volúmenes de servicio
- Niveles de servicio

**Tabla 6:** Niveles de servicio en tramos carreteros (SCT,2021)

Carretera: Pachuca-Túxpan							Red: Federal Libre					
Tramo	Km	V.H.	Porcentaje		Tt	#C	VOLÚMENES DE SERVICIO					NS
			B	Cam			A	B	C	D	E	
Pachuca - X.C. Libramiento de Pachuca	2.60	4153	0%	3%	P	6	3489	5131	6773	8518	10262	B
X.C. Libramiento de Pachuca - T. Izq. Pachuquilla (1ºAcceso)	7.00	3678	0%	4%	P	6	3449	5072	6695	8420	10144	B
T. Izq. Pachuquilla (1ºAcceso) - T. Izq. Pachuquilla (2ºAcceso)	10.50	2008	1%	10%	P	8	4476	6583	8689	10927	13166	A
T. Izq. Pachuquilla (2ºAcceso) - T. Der. Cd. Sahagún	16.59	1723	1%	8%	L	4	2077	3054	4032	5070	6108	A
T. Der. Cd. Sahagún - T.C.Venta de Carpio - Tulancingo	36.45	1569	1%	10%	L	4	1967	2893	3818	4802	5785	A
T.C.Venta de Carpio - Tulancingo - T. Izq. Libramiento de Tulancingo	59.33	2228	1%	9%	L	4	1972	2900	3828	4815	5801	B
T. Izq. Libramiento de Tulancingo - T. Izq. Huayacocotla	60.16	1613	1%	11%	M	2	86	188	331	497	974	F
T. Izq. Huayacocotla - T. Izq. Honey	63.00	1302	3%	9%	L	2	134	337	622	935	1661	E
T. Izq. Honey - Lim. Edos. Term. Hgo. Ppia. Pue.	83.18	640	1%	11%	L	2	132	332	611	911	1616	D

La SCT con todos estos datos considera el tramo completo con un **nivel de servicio B**, sin embargo, en este proyecto no se considera todo el tramo carretero sino solo una pequeña parte, por lo que este dato servirá únicamente como una referencia.

### 2.3.8 Semaforización

La instalación de semáforos es una cuestión que puede traer grandes beneficios, o en su defecto, perjuicios si es que la instalación no está bien fundamentada, es por eso que se cuenta con algunas ventajas y desventajas con la instalación de semáforos (López, 2018):

#### Ventajas:

- Reducción en accidentes por colisiones a 90°
- Movilidad ordenada del tránsito
- Seguridad para los peatones
- Cuando los semáforos se encuentran coordinados, hay un flujo continuo en la red vial

### Desventajas:

- Conflictos viales
- Demoras
- Se provoca la desobediencia del usuario

### Volumen mínimo de vehículos:

Para implementar semáforos en una intersección, este debe cumplir con cierto número de vehículos por hora para calles principales o secundarias, la **tabla 7** muestra los requisitos necesarios (SCT, 2023).

**Tabla 7:** Volumen mínimo vehicular (Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad, 2014).

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	500	150
2 o más	1	600	150
2 o más	2 o más	600	200
1	2 o más	500	200

### Requisitos para la instalación de semáforos:

La implementación de semáforos requiere que se cumplan cierto tipo de requisitos, como los que se muestran a continuación, los cuales se explican de manera más precisa en el *“Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad”* de la SCT. Si ninguno de los requisitos se cumple al 100% pero dos o más logran satisfacer en un 80% se puede realizar la instalación (Cal y Mayor, 2018):

1. Volumen mínimo de vehículos (Apartado anterior).
2. Circulación transversal.
3. Volúmenes en horas de máxima demanda.

4. Volumen mínimo de peatones.
5. Antecedentes sobre los accidentes.
6. Amplias fluctuaciones del tránsito en ambos accesos de la intersección.
7. Intersecciones amplias e irregulares con más de 4 accesos.
8. Circulación progresiva.
9. Interrupción del tránsito continuo.
10. Semáforos en zonas de alto volumen peatonal.
11. Semáforos en zonas escolares.
12. Semáforos especiales de destello.
13. Combinación de requisitos.

La **imagen 7** muestra un resumen de los requisitos junto con cada situación en la que se pueden implementar semáforos.

Requisitos para la instalación de semáforos	Tipo de semáforo				
	No accionados por el tránsito	Accionados por el tránsito	Para pasos peatonales	En zona escolar	De destello
<b>Semáforos vehiculares</b>					
Volumen mínimo vehicular	✓	✓		✓	
Circulación transversal		✓			
Volúmenes en horas de máxima demanda		✓			
Volumen mínimo de peatones	✓	✓	✓	✓	
Antecedentes sobre accidentes	✓	✓			
Amplias fluctuaciones del tránsito		✓			
Intersecciones amplias e irregulares		✓	✓		
Sistemas progresivos de semáforos		✓			
Interrupción del tránsito continuo	✓				
Circulación progresiva	✓				
Zonas con circulación de un solo sentido		✓			
Combinación de requisitos	✓				
<b>Semáforos peatonales y escolares</b>					
Fase exclusiva			✓		
Intervalo libre			✓		
Zona de seguridad durante un intervalo			✓		
Existencia de vehículos pesados			✓		
Fase de verde demasiado corta			✓		
Incremento del tiempo de ciclo			✓		
No existen semáforos cercanos				✓	
<b>Semáforos especiales</b>					
Obstrucciones en la vialidad					✓
Intersección importante oculta por una obstrucción					✓
Alineamiento vertical u horizontal peligroso					✓
Riesgos especiales o regulación del tránsito					✓
Distancia de alcance visual limitado					✓

**Imagen 7:** Requisitos mínimos para semáforos (SCT, 2023).

### 2.3.9 Metodología Webster

El método Webster una serie de pasos que se utiliza para obtener el control adecuado de los semáforos en las intersecciones. Esta metodología, utiliza los flujos de saturación de cada fase y con esto determinar un tiempo de ciclo mínimo de para el correcto funcionamiento del semáforo (Mendoza Galán, 2017) .

Esta metodología consta de una serie de ecuaciones para obtener las duraciones de cada fase.

#### 1.- Intervalo de cambio de fase

Aquí se alerta a los conductores de un cambio en la asignación del derecho al uso en la intersección (Cal y Mayor, 2018). La **ecuación 2.2** desglosa las variables necesarias para calcular este intervalo.

**Intervalo de cambio de fase= Amarillo + Todo rojo**

$$y = \left( t + \frac{v}{2a} \right) + \left( \frac{w + W + L}{v} \right)$$

Donde:

y= Intervalo de cambio de fase (Amarillo + Todo rojo) (s)

t= Tiempo de percepción-reacción del conductor (Valor usual 1.00) (s)

v= Velocidad de aproximación de los vehículos (m/s)

a= Tasa de desaceleración (Valor usual 3.05) (m/s<sup>2</sup>)

w= Ancho de cruce peatonal (m)

W= Ancho de intersección a cruzar (m)

L= Longitud del vehículo (Valor usual 6.10) (m)

## 2.- Vehículos equivalentes

Si todos los vehículos en una intersección con semáforos avanzan en línea recta, se lograrían tasas máximas de flujo con intervalos regulares. Sin embargo, la situación suele ser más complicada debido a la presencia de vehículos pesados y giros a la izquierda o a la derecha (Cal y Mayor, 2018). Para considerar estos factores, es necesario aplicar factores de equivalencia como se describe en la **ecuación 2.3**:

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

$f_{HV}$ = Factor de ajuste por efecto de vehículos pesados (adimensional)

$P_T$ = Porcentaje de camiones en la corriente vehicular

$P_B$ = Porcentaje de autobuses en la corriente vehicular

$P_R$ = Porcentaje de vehículos recreativos en la corriente vehicular

$E_T$ = Automóviles equivalentes a un camión

$E_B$ = Automóviles equivalentes a un autobús

$E_R$ = Automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

## 3.- Longitud de ciclo

Previo a calcular el tiempo de ciclo se deben obtener el **tiempo total perdido por ciclo**, este se representa con la **ecuación 2.4**:

$$P = \sum_{i=1}^{\phi} (A_i + TR_i)$$

Donde:

$P$ = Tiempo total perdido por ciclo (s).

$A_i$ = Intervalo amarillo (s).

$TR_i$ = Intervalo rojo absoluto (s).

Para calcular el **tiempo de ciclo** ( $T_{co}$ ) se emplea la **ecuación 2.5**:

$$T_{co} = \frac{1.5P + 5}{1 - Y}$$

**Donde:**

$T_{co}$ = Tiempo de ciclo óptimo (s).

$P$ = Tiempo perdido por ciclo (s).

$Y$ = Flujo de saturación en la intersección

#### 4.- *Asignación de tiempos de verde*

Primero se debe obtener el **tiempo de verde efectivo total** como se indica en la **ecuación 2.6**:

$$g_T = T_{co} - P$$

**Donde:**

$g_T$ = Tiempo de verde efectivo total (s).

$T_{co}$ = Tiempo de ciclo óptimo (s).

$P$ = Tiempo perdido por ciclo (s).

Posterior a esto se debe definir el **tiempo efectivo de verde** con la **ecuación 2.7**:

$$G_t = \frac{Y_i}{Y} \times g_T$$

**Donde:**

$G_t$ = Tiempo efectivo de verde (s).

$P$ = Tiempo perdido por ciclo (s).

$Y$ = Flujo de saturación en la intersección

$g_T$ = Tiempo de verde efectivo total (s).

### 5.- Asignación de tiempos de rojo

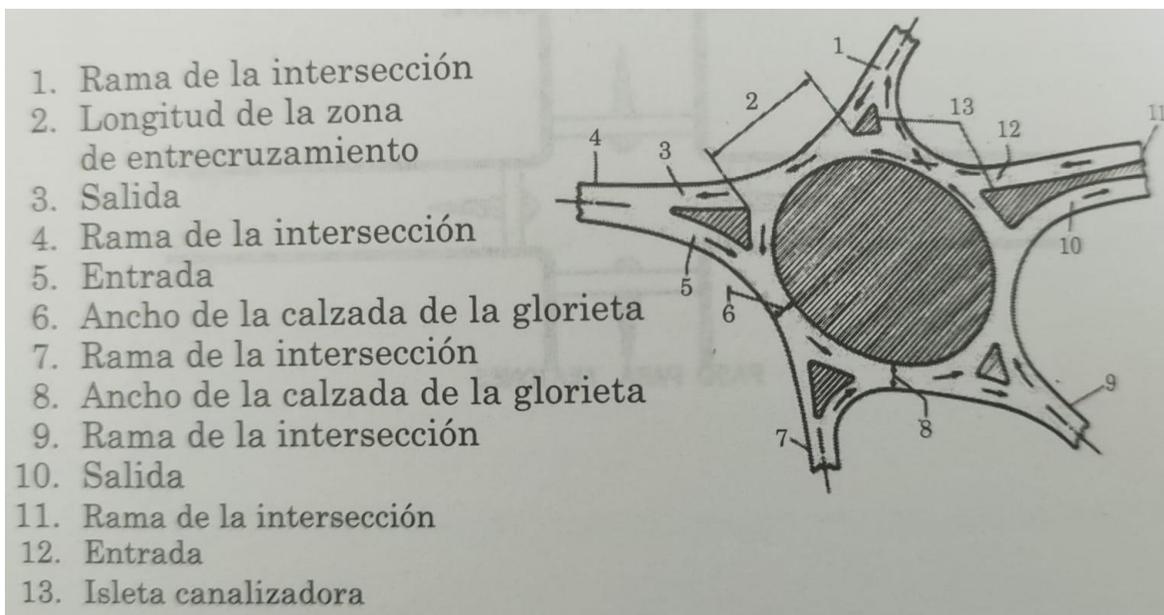
Finalmente, para obtener el tiempo de duración de rojo se deberá restar el tiempo efectivo de verde y la duración del ámbar al tiempo de ciclo.

### 2.4 Criterios en el diseño de glorietas

Las rotondas o glorietas son intersecciones entre dos o más caminos, las cuales están compuestas por una calzada anular de un solo sentido de circulación donde la salida será únicamente con giros hacia la derecha (SCT, 2018).

#### **Justificación:**

- Las glorietas de cuatro ramas son más eficientes cuando los volúmenes de tránsito de todas las ramas procedentes son del orden de los 3000 veh/h, si el volumen horario es mayor se recomienda realizar un análisis de capacidad detallado.
- No se puede justificar una glorieta de 5 o más ramas ya que se verán disminuida la distancia de entrecruzamiento, por lo que se reduce la capacidad y pueden incrementar los accidentes viales.
- Cuando las ramas excedan a 4, deberán ser canalizadas con anterioridad a otras ramas de la glorieta. La **imagen 8** muestra los componentes principales de una glorieta:



**Imagen 8:** Partes de una glorieta (López, 2018).

#### 2.4.1 Trazado de la isleta central de una glorieta

Para realizar el trazado de la isla o isleta central de una glorieta se recomienda seguir con los siguientes parámetros (SCT, 2018):

- Es recomendado que la alineación de los ejes del camino que intersectan en la glorieta pasen por el centro de la isleta, en caso de no ser así, se recomienda que la parte mayor de la isleta se ubique a la derecha de los ejes del camino.
- La dimensión que tendrá la isleta central va a depender de la velocidad de proyecto, así como del número y ubicación de las ramas y las longitudes de entrecruzamiento que sean requeridas.
- En cuanto a su geometría, es recomendado que la isleta tenga forma circular, elíptica o en su defecto rectangular (con sus extremos circulares), así como radios entre 15 y 30 m. En función a los vehículos del proyecto y los radios de giro asigna el ancho de los carriles de la calzada como se muestra en la **tabla 8**.

**Tabla 8:** Ancho de calzada en glorietas (SCT, 2018).

R Radios de la orilla interna de la calzada (m)	Anchos de calzada en ramales (m)								
	CASO I 1 Carril Operación en un sentido, sin			CASO II 1 Carril Operación en un sentido, con			CASO III 2 Carriles Operación en uno o dos sentidos		
	Condición de tránsito								
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
15.00	5.50	5.50	7.00	7.00	7.50	8.75	9.50	10.75	12.75
23.00	5.00	5.25	5.75	6.50	7.00	8.25	8.75	10.00	11.25
31.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.75	7.50	8.50	9.50	10.75
46.00	4.25	5.00	5.25	5.75	6.50	7.25	8.25	9.25	10.00
61.00	4.00	5.00	5.00	5.75	6.50	7.25	8.25	8.75	9.50
91.00	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.75	8.00	8.50	9.25
122.00	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.75	8.00	8.50	8.75
152.00	3.75	4.50	4.50	5.50	6.00	6.75	8.00	8.50	8.75
Tangente	3.75	4.50	4.50	5.25	5.75	6.50	7.50	8.25	8.25
Modificaciones al ancho de acuerdo con el tratamiento de las orillas de la calzada									
Guarnición achaflanada	Ninguna			Ninguna			Ninguna		
Guarnición vertical:									
Un lado	Aumentar 0.30 m			Ninguna			Aumentar 0.30 m		
Dos lados	Aumentar 0.60 m			Aumentar 0.30 m			Aumentar 0.60 m		
Acotamiento en uno o en ambos lados	Ninguna			Restar el ancho del acotamiento. Ancho mínimo de la calzada del caso I.			Cuando el acotamiento sea de 1.20 m o mayor, reducir 0.60 m.		

La siguiente **tabla 9** muestra la situación actual de la isleta de la intersección respecto a los parámetros mencionados anteriormente:

**Tabla 9:** Parámetros a cumplir en isleta central (Elaboración propia).

Parámetro a evaluar	¿Cumple?	
	Si	No
Los ejes del camino que intersectan en la glorieta, pasan por el centro de la isleta.		X
La dimensión de la isleta central va de acuerdo a la velocidad de proyecto, así como el número de ramas y longitudes de entrecruzamiento.		X

Tiene forma circular o elíptica con radios de entre 15 y 30m.		X
---	--	---

#### 2.4.2 Sobreelevaciones

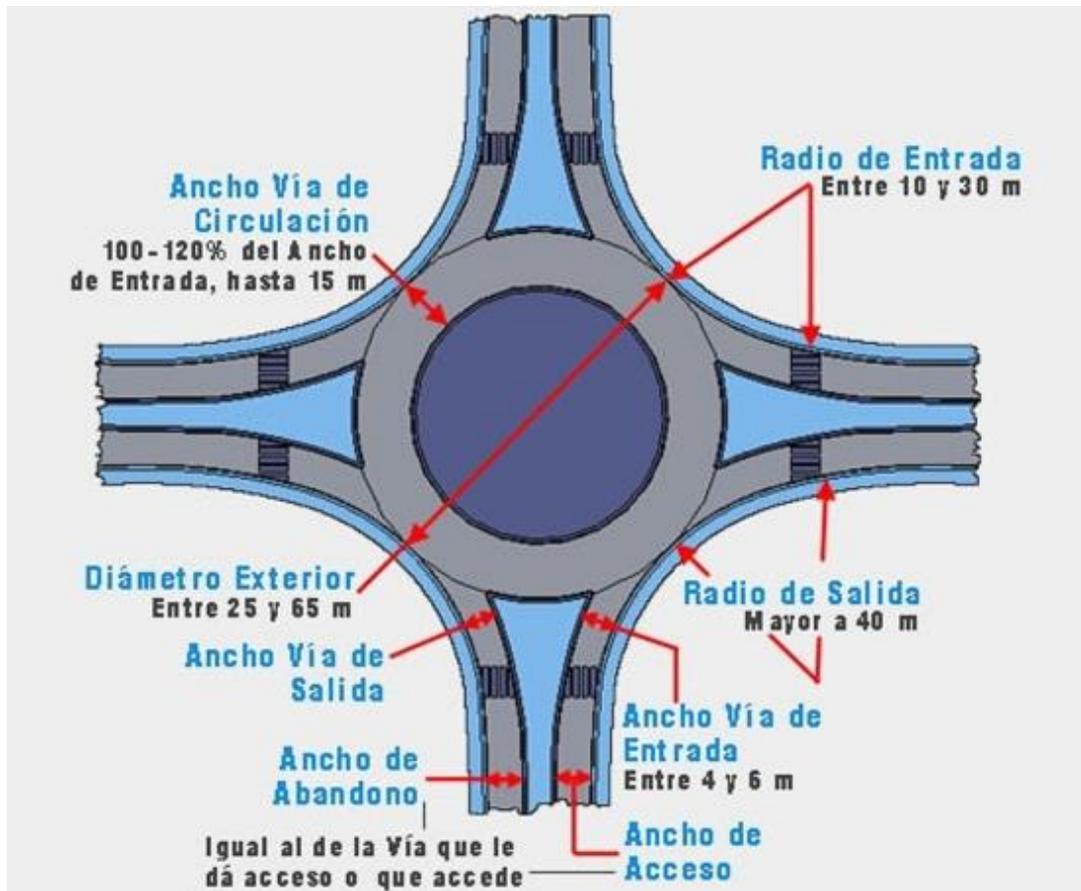
El peralte mínimo que tendrá la calzada hacia el interior y exterior será mínimo del 2% y máximo del 3% (SCT, 2018). En la **tabla 10** se muestran las máximas diferencias algebraicas de pendientes transversales según la velocidad de proyecto para la calzada de la glorieta.

<b>Tabla 10: Pendientes transversales de la glorieta (SCT, 2018).</b>	
<b>Velocidad de proyecto de la calzada de la glorieta (Km/h)</b>	<b>Máximas diferencias algebraicas de pendientes transversales en el lomo de la corona (m/m)</b>
25-40	0.07 - 0.08
40-50	0.06 - 0.07
50-60	0.05 - 0.06

#### 2.4.3 Guarniciones y acotamientos

Las glorietas deberán estar limitadas por guarniciones achaflanadas, con excepción de lugares con cruce para peatones, en estos casos la guarnición será de tipo vertical. En cuanto a los acotamientos, estos deberán tener una anchura de 3.60 m a la orilla exterior de la calzada de la glorieta, deberá hacer un contraste con el color y la textura de la calzada (SCT, 2018).

Finalmente, la **figura 9** muestra algunas recomendaciones al diseñar glorietas:



**Imagen 9:** Parámetros geométricos en una glorieta (CADBIM, 2015).

## 2.5 Simuladores de tránsito

### 2.5.1 Definición

Hoy en día existen herramientas que ayudan a la planeación y análisis en el comportamiento del flujo vehicular en un camino como lo son los **simuladores de tránsito**, estos son softwares ayudan a predecir como será el comportamiento del tránsito en un sitio determinado en condiciones tanto ordinarias como particulares, permite planificar escenarios a futuro y logra mejorar la circulación en la vía (Ingartek Consulting, 2019).

### 2.5.2 Softwares de simulación

Existen diversos softwares que ayudan a realizar simulaciones de tránsito, algunas de las opciones que se tienen son las siguientes:

#### **Highway Capacity Software (HCS)**

Es un Software desarrollado por el “MC Trans” del Instituto de transporte de la Universidad de Florida, tiene un enfoque macroscópico especializado en modelar el tránsito en calles superficiales, puede realizar un análisis a nivel de planificación y operación de estas calles (Mc Trans, 2022).

Este programa puede modelar:

- Segmentos de autopistas
- Intersecciones controladas
- Calles principales y secundarias con intersecciones señalizadas
- Rotondas

#### **PTV Vissim**

Es un software de origen alemán que ofrece una simulación detallada y realista de tránsito y transporte para modelar distintos escenarios, que van desde uniones estándar hasta intersecciones con un grado de complejidad mayor donde se tenga que priorizar el paso de transporte público o el uso de sistemas de semaforización, además de ofrecer una flexibilidad para trazar prácticamente cualquier tipo de geometrías (GROUP, 2023).

#### **SIDRA Intersection**

Es un software es una herramienta de análisis de nodos y redes varias, evalúa el nivel de servicio de los viajes, coste de operación, coste de usuario, combustible, entre otros. Puede ser utilizado para realizar comparativas entre distintos tipos de intersecciones como semaforizadas, glorietas, cruces y variaciones de estas mismas (SIDRA Solutions, 2023).

## Eclipse SUMO

Es un software gratuito de simulación de tránsito el cual permite modelar sistemas de tránsito intermodal en el cual se pueden incluir los vehículos de la carretera, los peatones y el transporte público. Algunas de sus funciones son evaluar el desempeño de los semáforos, pronosticar el tránsito, simula tránsito en estacionamientos, entre otras aplicaciones similares (SUMO, 2018).

Una vez definidos los softwares de simulación de tránsito más populares a nivel mundial (Borja Moreno, 2016), se ha seleccionado **PTV Vissim** para la realización del proyecto, debido a su fácil acceso a la versión de estudiante, pocas limitantes con esta versión, existencia de variedad de tutoriales de libre acceso y que es un software cuya operación es intuitiva.

### 2.5.3 Casos de estudio con PTV Vissim

El software PTV Vissim ya ha sido empleado para algunos casos de estudio, un ejemplo de esto es cuando se utilizó el programa en la búsqueda de solución para un desnivel en la glorieta de la Av. Calle 63 en la localidad de Barrios Unidos, Bogotá. Gracias a simulaciones de distintos casos se obtuvieron resultados que benefician al nivel de servicio de la glorieta, este logró pasar de un nivel de servicio F, satisfactoriamente a un nivel de servicio C (Sierra, 2021).

Vissim también ha sido aplicado para casos de estudio en México, por ejemplo, el realizado por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). El enfoque de este caso fue realizar un análisis al comportamiento de las líneas de espera (colas) para el pago en la plaza de cobro de la autopista México-Querétaro, donde, con ayuda de Vissim se realizarían simulaciones para conocer y optimizar las longitudes promedio de colas; se realizaron 15 simulaciones en 5 escenarios distintos de 7200 segundos cada uno, donde el cuarto escenario presentó una reducción de 179 a 98 metros promedio de longitudes de cola (Acha, Moreno, & Martínez, 2020).

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1 Introducción

En el desarrollo de este capítulo se describen los procedimientos a realizar para llegar a las conclusiones del proyecto, para este trabajo se realizaron aforos vehiculares, el cálculo del volumen horario de máxima demanda (VHMD) y el procesamiento de dichos datos en el software PTV Vissim para simular su comportamiento actual y las dos propuestas de solución.

### 3.2 Realización de aforos vehiculares

El propósito de realizar aforos vehiculares fue recabar información respecto a los volúmenes de tránsito en el sitio de estudio.

Para esto, se seleccionaron 5 personas de las cuales 3 trabajan en la gasolinera que está a un costado del centro de autoservicio Aurrerá y a dos taxistas cuya base está en el mismo establecimiento, de las cinco personas consultadas, todas indicaron que la hora de mayor flujo suele ser entre las 13:00 y las 14:00 horas.

Teniendo en cuenta lo anterior y que los jueves hay más flujo vehicular debido a que es el día en el que se ponen distintas plazas en la ciudad, se decidió aforar los días **martes, miércoles y jueves** comenzando desde las **12:30** y finalizando a las **15:30**, con intervalos de tiempo a cada **15 minutos** como es recomendado en la bibliografía de “Ingeniería de tránsito” de Rafael Cal y Mayor (2018).

Se tomaron en cuenta los siguientes vehículos, descritos en el capítulo 2:

Transporte público

- Taxis (Se considerará como A2)
- Combis (Se considerará como A2)
- Autobuses (B2)

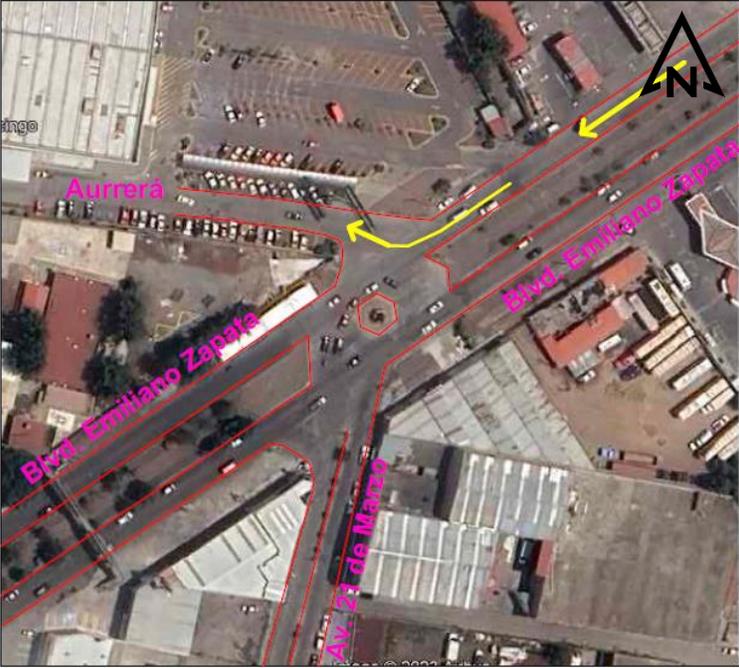
Autos particulares:

- A2 y Motocicletas

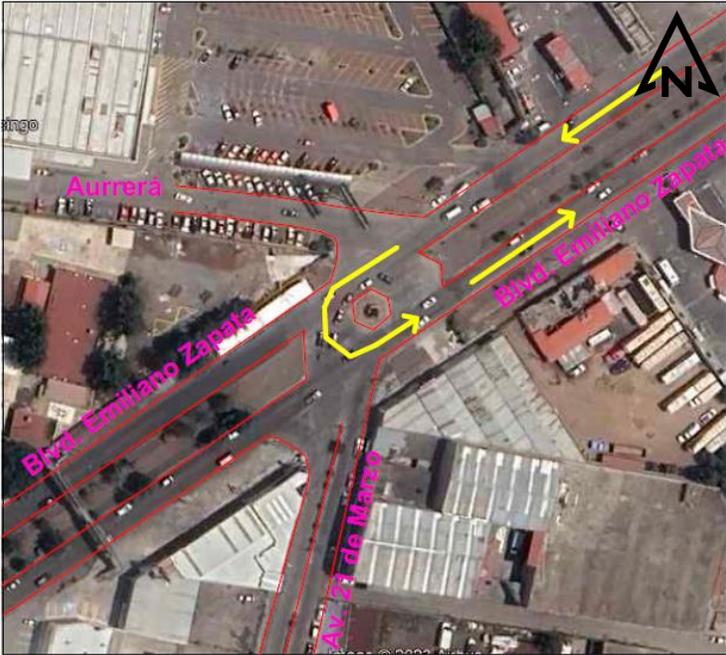
Transporte pesado:

- Camiones unitarios (C2 y C3)
- Tractocamiones con semirremolque (T3-S1, T3-S2 y T3-S3)

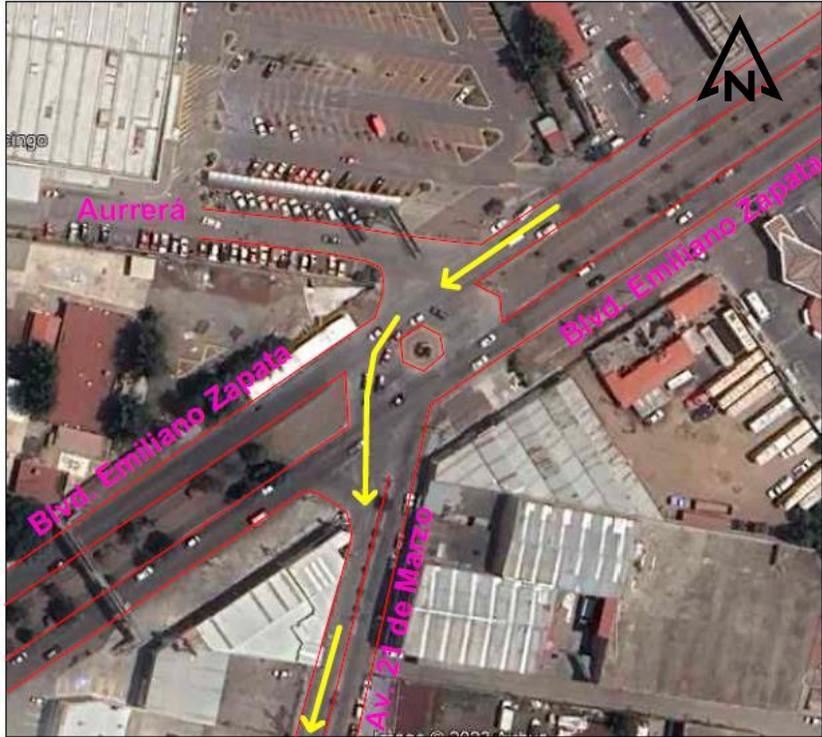
A continuación, de la **imagen 10 a la 21**, se presentan imágenes con todos los movimientos analizados en la realización de los aforos, donde cada color representa el grupo de movimientos asignados por aforador:



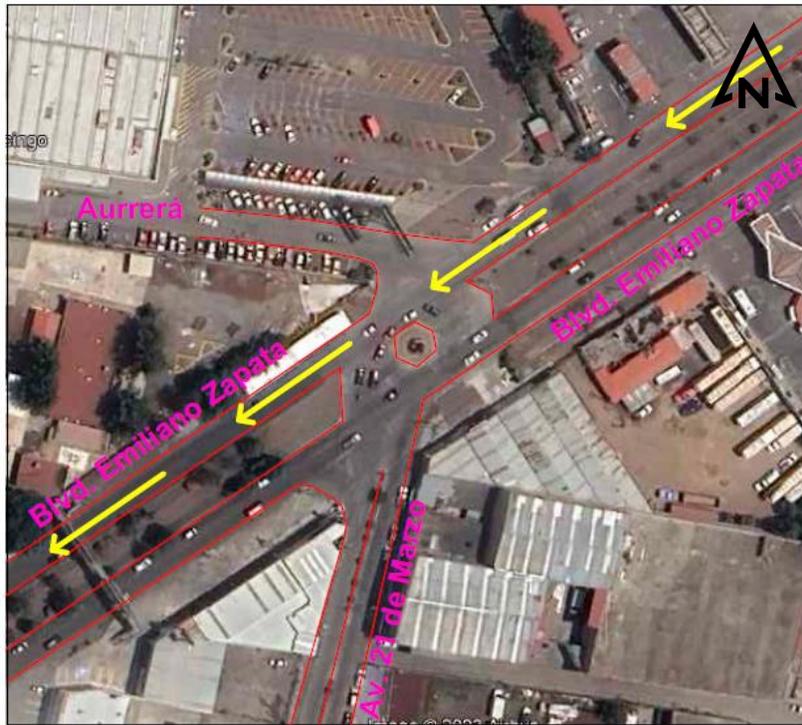
**Imagen 10:** Movimiento 1 (Elaboración propia).



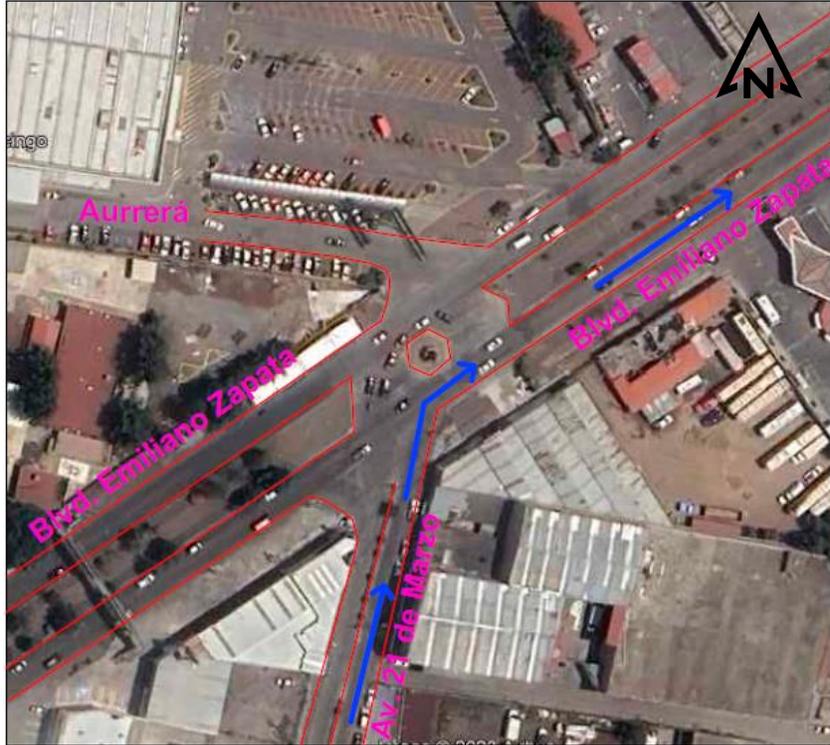
**Imagen 11:** Movimiento 2 (Elaboración propia).



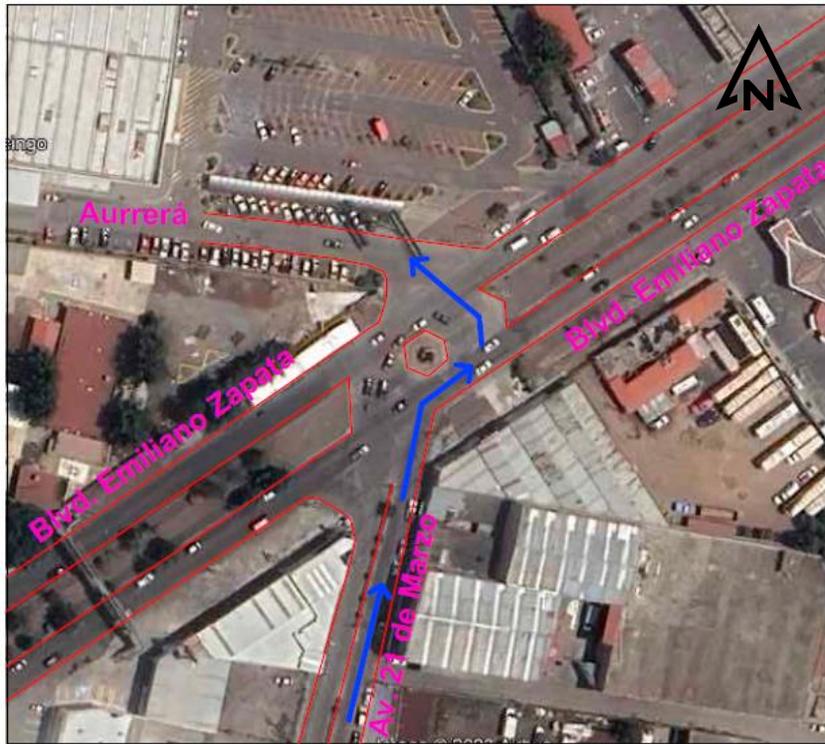
**Imagen 12:** Movimiento 3 (Elaboración propia).



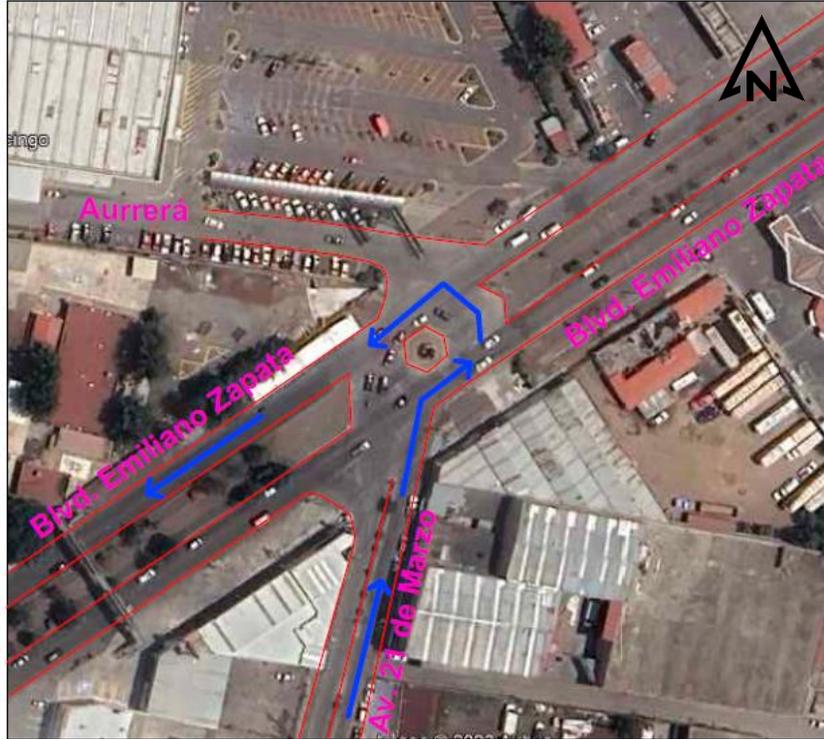
**Imagen 13:** Movimiento 4 (Elaboración propia).



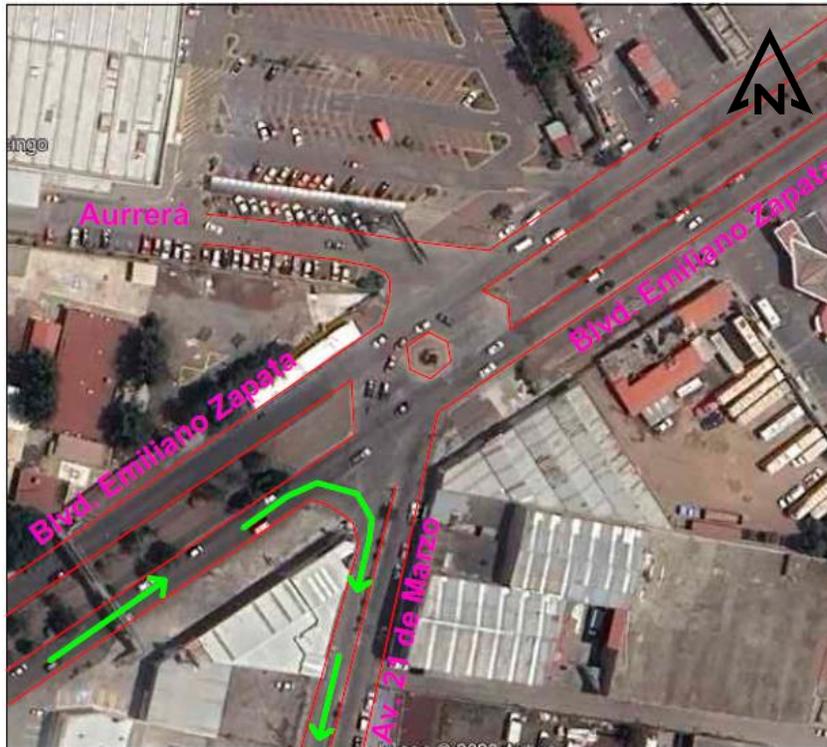
**Imagen 14:** Movimiento 5 (Elaboración propia).



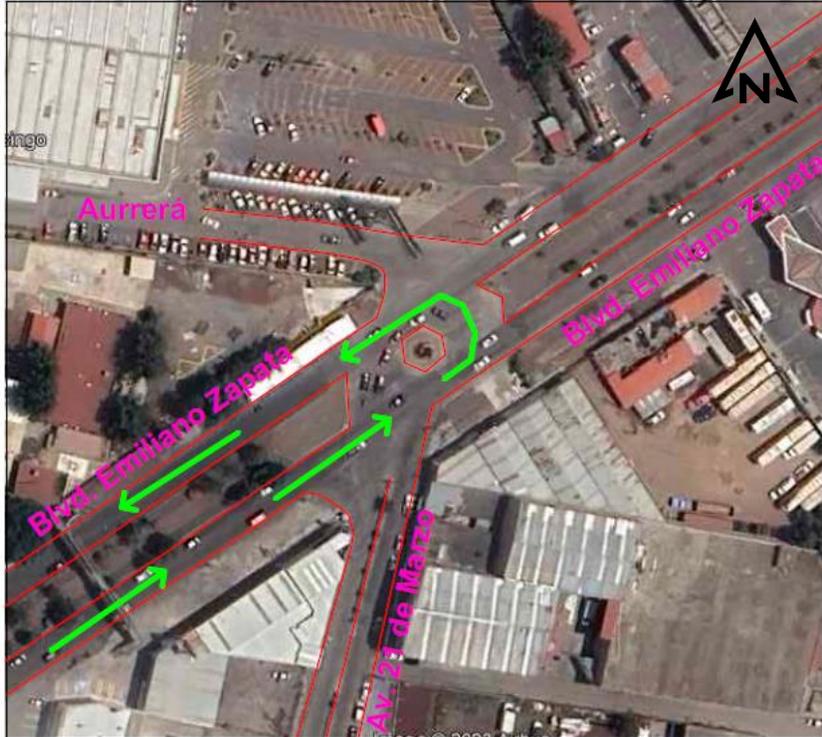
**Imagen 15:** Movimiento 6 (Elaboración propia).



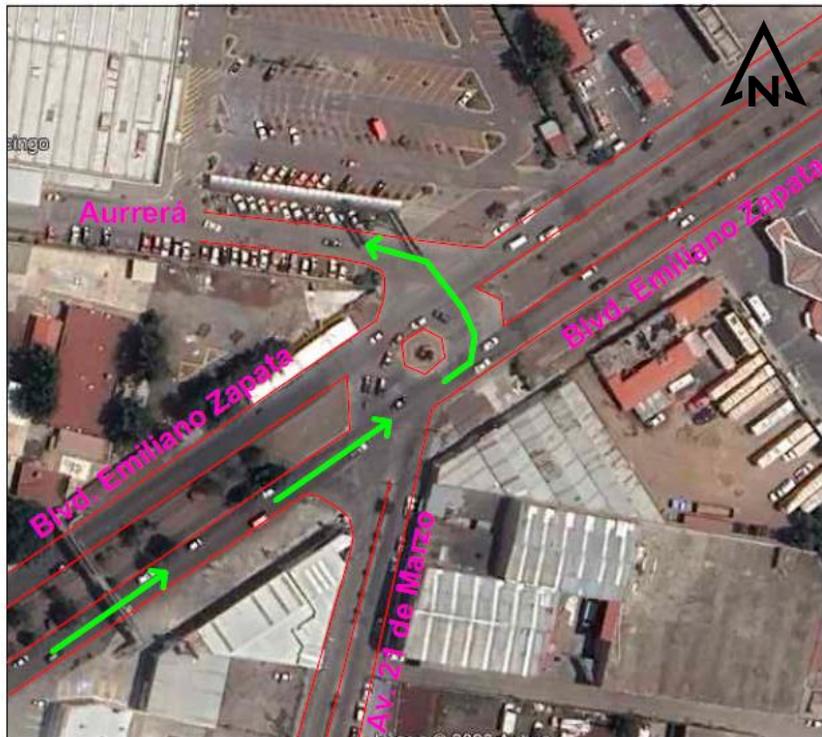
**Imagen 16:** Movimiento 7 (Elaboración propia).



**Imagen 17:** Movimiento 8 (Elaboración propia).



**Imagen 18:** Movimiento 9 (Elaboración propia).



**Imagen 19:** Movimiento 10 (Elaboración propia).

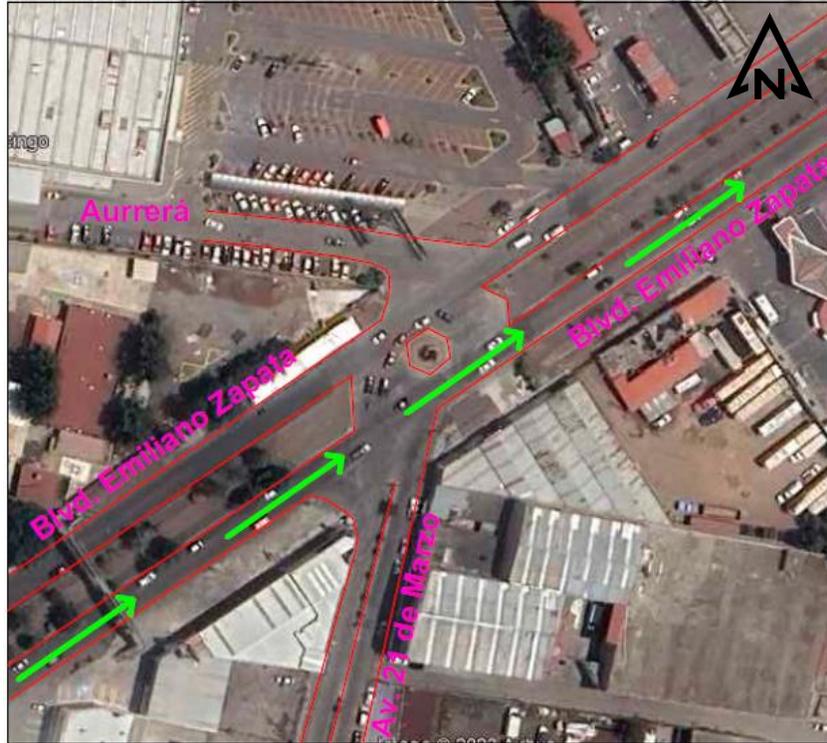


Imagen 20: Movimiento 11 (Elaboración propia).

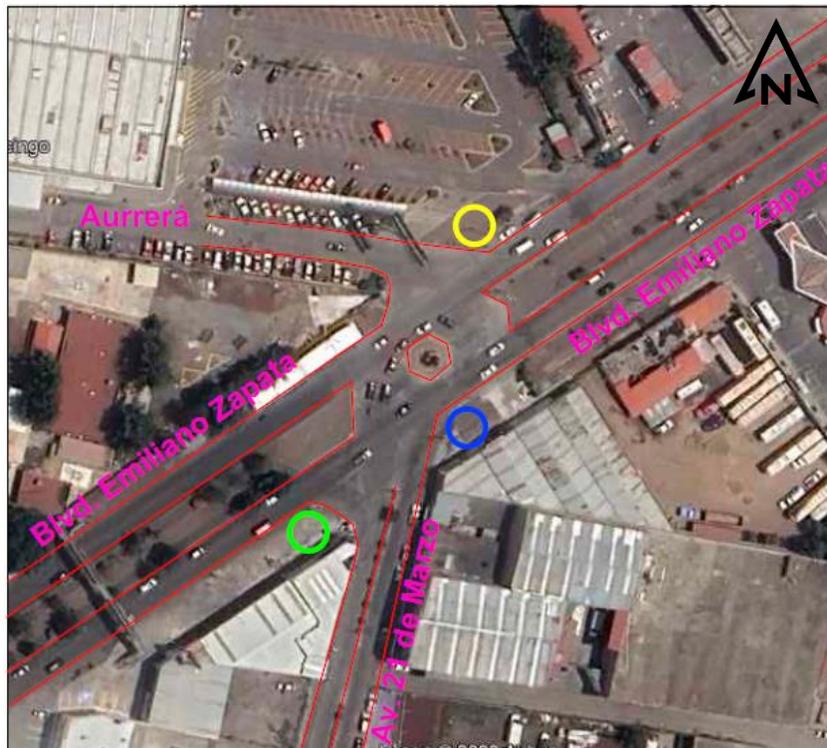


Imagen 21: Ubicación de los aforadores (Elaboración propia).

Además, se presenta a continuación el formato utilizado para la realización de este estudio.

Este formato presenta la siguiente estructura: En la esquina superior izquierda se encuentran los datos del aforador, la ubicación de la intersección a aforar, fecha y estado del clima.

En la esquina superior derecha se encuentra un espacio con la leyenda “Movimiento”, en el cual se insertará una imagen para mostrar los movimientos (Que son los trayectos de las imágenes anteriores) a cada aforador se le asignó un grupo de movimientos con un color distintivo, esto fue con base en las posiciones estratégicas propuestas en la **imagen 21**.

La tabla que abarca el resto del formato es donde se deberá vaciar la información en tiempo real de los aforos, la columna de color verde muestra los intervalos de tiempo que son de 15 minutos, el aforo de este estudio inició a las 12:30 del mediodía y concluyó a las 15:30.

Así mismo, existe una fila donde se clasifican los vehículos por las siguientes categorías: Transporte público, Automóviles particulares y transporte pesado. En cada una de estas categorías viene una imagen representativa de los vehículos y su nomenclatura como se indicaron en el apartado **2.3.5 Aforos vehiculares**.

La **imagen 22** muestra el aspecto del formato utilizado para los aforos.



**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**  
 Área Académica de Ingeniería y Arquitectura  
 Lic. Ingeniería Civil  
 Formato de aforo vehicular

**Movimiento:**

<b>Tiempo:</b>	Francisco Albarrán Escobedo	
<b>Ubicación:</b>	Blvd. Arriano Zapata, Los Pinos, Jalisco Co. Branc, Hidalgo.	
<b>Fecha:</b>		Clase

Categoría	Transporte público			Particulares		Transporte pesado			OTROS	Subtotal:			
	Nomenclatura	Taxi	Microbus	Autobus (B2)	Automóvil (A2)	Motocicletas	R2	R2			C3	T3-S1	T3-S2
Hora de													
17:30	17:45												
17:45	18:00												
18:00	18:15												
18:15	18:30												
18:30	18:45												
18:45	19:00												
19:00	19:15												
19:15	19:30												
19:30	19:45												
19:45	20:00												
20:00	20:15												
20:15	20:30												
20:30	20:45												
20:45	21:00												
21:00	21:15												
21:15	21:30												
<b>Subtotal:</b>													

**Imagen 22:** Formato de aforos vehiculares (Elaboración propia).

Una vez realizados los aforos, y procesando los datos en Excel, se llegó a la conclusión que la hora de máxima demanda comprende desde las 13:00 horas hasta las 14:00 horas en el día jueves, con un **VHMD= 3647** automóviles.

Posteriormente, al analizar cada intervalo de 15 minutos, el periodo crítico se presentó entre **13:15** y **13:30** horas teniendo un flujo vehicular de **779** automóviles en dicho periodo.

La **tabla 11** muestra un resumen de los datos obtenidos en todo el día aforado:

<b>Tabla 11: Vehículos totales en el tiempo aforado (Elaboración propia).</b>	
Automóviles	82.23%
Motocicletas	7.25%
Autobuses	5.91%
Camiones pesados	4.61%
<b>TOTAL:</b>	<b>100%</b>

**Nota:** Todas las nomenclaturas que aparecen en la figura 3.12 se categorizaron para adaptarse tal como aparece en la tabla 3.1, esto con el fin de facilitar el ingreso de dichos datos en el software.

### 3.3 Estado actual de la intersección

La intersección ubicada en el boulevard Emiliano Zapata en Tulancingo, Hidalgo trata de realizar la función de una glorieta, sin embargo, no cumple con los requisitos de forma circular, intersección de ejes al centro de la isleta y radios de la misma mencionados en el apartado **2.4 Criterios en el diseño de glorietas**, debido a que posiblemente no fue diseñada para que funcione como una glorieta sino como una intersección de tipo “T”.

En este apartado, con los datos obtenidos en campo de los aforos y las características del camino descritas a continuación, se llevará a cabo la simulación en el software para visualizar los comportamientos de este y los demás escenarios.

Respecto al resto del camino, cuenta con las siguientes características y criterios:

#### **Usuario**

Este camino es transitado en su mayoría por vehículos, para el paso peatonal se encuentra un puente a unos cuantos metros al oeste de la intersección.

#### **Vialidad**

- **Ancho de calzada:** 7m
- **No. Carriles:** 2
- **Tipo de camino:** B
- **Señalamiento vertical:** Si, una SP-16 y una SP-32
- **Señalamiento horizontal:** No

#### **Vehículos**

Los principales vehículos que circulan por el camino son automóviles (A2), autobuses (B2), camiones unitarios (C2 y C3) y tractocamiones con semirremolque (T3-S1, T3-S2 y T3-S3).

### **Dispositivos de control y seguridad.**

No hay presencia de dispositivos de control en la vialidad como lo pueden ser barreras de protección, barreras separadoras, amortiguadores de impacto, botones reflejantes o delimitadores.

Una vez explicadas las características de la intersección y el resto del camino, se procedió a realizar el modelado y simulación del estado actual de dicha intersección.

Utilizando las funciones del software "**Tramo**", "**conectores**" y "**Añadir enlace circular**" se trazó la geometría del camino guiándose de la imagen previamente insertada del sitio de estudio, dando como resultado el camino como se muestra en la **imagen 23**:



**Imagen 23:** Intersección modelada en PTV Vissim (Elaboración propia).

Los siguientes datos se ingresarán a Vissim para modelar y recrear el actual comportamiento de la intersección, este modelo se usará como base para implementar las otras propuestas, es por ello que la información será la misma.

- **Salidas de vehículos:** 3
- **Número de rutas:** 11
- **Volumen de tránsito:** 3647 veh/h.

Como se muestran en la **imagen 24** se insertaron tres salidas vehiculares, esto es para indicarle al software desde donde comenzarán a salir vehículos para posteriormente indicar las rutas, esto depende meramente de la geometría del camino, a cada salida se la asignó su respectivo volumen vehicular obtenido:



**Imagen 24:** Salidas y volúmenes vehiculares en PTV Vissim (Elaboración propia).

Estas salidas fueron insertadas con la herramienta “**Vehicle inputs**” donde posteriormente se colocaron en los lugares mostrados y en la tabla desplegada se asignaron los correspondientes volúmenes a cada salida

En la misma barra de herramientas se seleccionó “**Vehicle routes**” para insertar tres grupos de rutas con sus respectivos movimientos como se explicó en el apartado **3.2 Realización de aforos vehiculares** de la figura 3.1 a la 3.11

Una vez definidas las rutas, se desplegó nuevamente un apartado donde se indican todos los grupos de rutas con sus movimientos, en estos habrá que asignar los

porcentajes de autos que realizan cada movimiento, dando la sumatoria de estos el 100%, tal y como se muestra en la **imagen 25**:

Conteo	No	Nom	Tramo	Pos	AllVehTypes	VehClasses	RouteChoiceMeth
1	1	2	0.911	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	
2	2	6	0.919	<input type="checkbox"/>	10,70	Static	
3	3	4	0.799	<input checked="" type="checkbox"/>		Static	

Conteo	VehRoutDec	No	Nom	Formula	DestLink	DestPos	RelFlow(0-MAX)
1	1	1			3	150.075	0.920
2	1	2			7	65.965	0.050
3	1	3			8	63.480	0.010
4	1	4			5	137.196	0.020

**Imagen 25:** Rutas vehiculares en PTV Vissim (Elaboración propia).

Una vez insertadas las rutas se debe conocer las áreas de conflicto en la intersección, para esto, se utilizó la herramienta “Conflict areas”, el programa indicó cuales son los puntos donde se puede generar un problema, por lo que hay que indicarle quienes tienen la prioridad al transitar, dando como prioridad a los vehículos que continúan recto sobre el boulevard ya que es como actualmente opera. La **imagen 26** muestra las áreas de conflicto en la intersección.

Conteo	LinkA	VisibLinkA	LinkB	VisibLinkB	Status
6	1	100.0	10005	100.0	B has right of way
7	4	100.0	10005	100.0	Passive
8	10003	100.0	10005	100.0	B has right of way
9	1	100.0	10006	100.0	Passive
10	10000	100.0	10006	100.0	Passive

**Imagen 26:** Áreas de conflicto en la intersección (Elaboración propia).

Para el caso de esta intersección se generaron 18 áreas de conflicto, las franjas en color verde representan los movimientos con prioridad mientras que el rojo los que deben esperar para poder incorporarse (**imagen 26**).

Una vez definidos todos estos parámetros, ya se puede proceder a realizar una simulación en la que se obtiene un video generado del comportamiento de la intersección, la **imagen 27** muestra como se ve la simulación en el programa.



**Imagen 27:** Simulación de tránsito en la intersección con PTV Vissim (Elaboración propia).

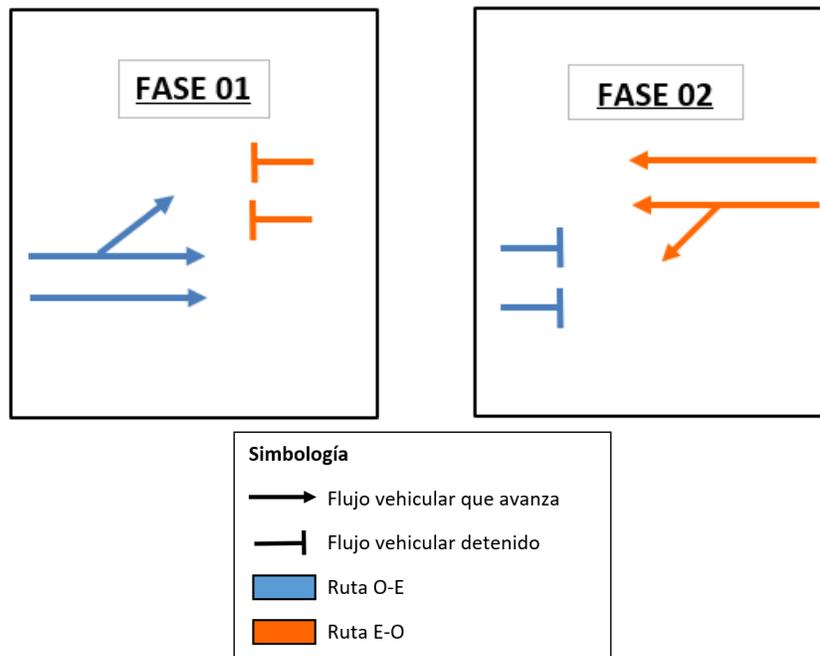
### 3.4 Propuesta 1: Implementación de semáforos

Con el fin de tener las menores fases posibles y agilizar el movimiento vehicular, se propusieron dos semáforos cuya ubicación se muestra en la **imagen 28**.



**Imagen 28:** Ubicación propuesta de los semáforos (Elaboración propia).

Además, se tomó como propuesta las fases que se muestran en la **imagen 29**, que como se puede observar, solo se realizaron para el boulevard y se contempla que la avenida que viene desde el sur sea continua con precaución.



**Imagen 29:** Fases de semáforos (Elaboración propia).

## 1.- Calcular intervalo de cambio de fase

Para obtener el intervalo de cambio de fase se usará la **ecuación 2.2**, la cual menciona que este intervalo es la suma de amarillo más el rojo absoluto.

$$y = \left( t + \frac{v}{2a} \right) + \left( \frac{w + W + L}{v} \right)$$

-Calculando el amarillo:

t= 1.00 s (Valor usual)

a= 3.05 m/s (Valor usual)

v= 60 km/h

-Convirtiéndola a m/s:

$$v = 60 \text{ km/h} \left( \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) \left( \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 16.67 \text{ m/s}$$

v= 16.67 m/s.

Sustituyendo en la **ecuación 2.2** el amarillo se representa de la siguiente manera:

$$\text{Amarillo} = \left( t + \frac{v}{2a} \right)$$

$$\text{Amarillo} = \left( 1 + \frac{16.67}{2(3.05)} \right) = 3.73 \text{ s} \approx \mathbf{4 \text{ s}}$$

-Calculando rojo absoluto:

Dentro de la **ecuación 2.2** el rojo absoluto se representa de la siguiente manera:

$$Rojo\ absoluto = \left( \frac{w + W + L}{v} \right)$$

Teniendo en cuenta que no existe un cruce peatonal “w” será igual a 0.

W= 7 m (ambos lados).

L= 6.10 m (valor usual).

v= 16.67 m/s.

Sustituyendo valores se tiene:

$$Rojo\ absoluto = \left( \frac{0 + 7 + 6.10}{16.67} \right) = 0.79\ s \approx 1\ s$$

Finalmente se suman estos dos valores para obtener el intervalo de cambio de fase (y):

$$y = Amarillo + Rojo\ absoluto$$

$$y = 4 + 1 = 5\ s$$

2.- Calcular la longitud del ciclo

Primero se debe calcular el tiempo total perdido por ciclo como lo muestra la **ecuación 2.4**:

$$P = \sum_{i=1}^{\phi} (A_i + TR_i)$$

$$P = \sum_{i=1}^{\phi} (A_1 + TR_1) + (A_2 + TR_2)$$

Teniendo en cuenta que, debido a la geometría de la intersección, los valores en amarillo y rojo absoluto son los mismos, se tiene:

$$P = (4 + 1) + (4 + 1)$$

$$P = 5 + 5 = \mathbf{10\ s}$$

Una vez obtenidos estos datos procedió a calcular el flujo de saturación de la intersección (un promedio de ambas fases) siguiendo la metodología de Webster para la obtención de las fases de semáforo. La **tabla 12** muestra el desarrollo de la metodología.

**Tabla 12:** Metodología de Webster (Elaboración propia).

FASE	MOVIMIENTO	I (Intensidad)	n (carriles)	feq (factor de equivalencia)	q=(I x feq)/n	Yi (flujo saturación)	
1	1	1385	2	1	692.50	0.385	0.385
	2	45	1	1.2	54.00	0.030	0.030
2	3	1338	2	1	669.00	0.372	0.372
	4	104	1	1.2	124.80	0.069	0.069

Aquí se tomó en cuenta 1 carril para los movimientos con giro y un factor de equivalencia (feq) de **1.2**, esto significa que se hace un ajuste para un movimiento (giro) del 20%. Realizando la sumatoria de los flujos de saturación (Yi) se tiene lo siguiente:

$$Yi_1 = Yi_{mov1} + Yi_{mov2} = 0.385 + 0.030 = \mathbf{0.415}$$

$$Yi_2 = Yi_{mov3} + Yi_{mov4} = 0.372 + 0.069 = \mathbf{0.441}$$

Finalmente se suman estos dos valores para obtener el flujo de saturación total:

$$Y = Yi_1 + Yi_2 = 0.415 + 0.441 = \mathbf{0.856}$$

El siguiente paso fue obtener el tiempo de ciclo óptimo (Tco) con la **ecuación 2.5**:

$$Tco = \frac{\mathbf{1.5P + 5}}{\mathbf{1 - Y}}$$

Sustituyendo con los valores previamente obtenidos:

$$T_{co} = \frac{1.5(10)+5}{1-0.856} = 138.88 \approx \mathbf{140\ s}$$

De acuerdo a la bibliografía es preferible redondear a múltiplos de 5.

3.- Calcular los tiempos de verde.

Siguiendo la metodología, el próximo paso es obtener el tiempo efectivo de verde total con ayuda de la **ecuación 2.6**:

$$g_T = T_{co} - P$$

Sustituyendo con los valores obtenidos:

$$g_T = 140 - 10 = \mathbf{130\ s}$$

Posteriormente con la **ecuación 2.7** se obtienen los tiempos efectivos de verde:

$$Gt = \frac{Yi}{Y} (g_T)$$

Recordando que el valor de  $Yi$  es distinto en cada fase, al sustituir en la ecuación se obtuvo lo siguiente:

$$G1 = \frac{0.415}{0.856} \times (130) = \mathbf{63\ s}$$

$$G2 = \frac{0.441}{0.856} \times (130) = \mathbf{67\ s}$$

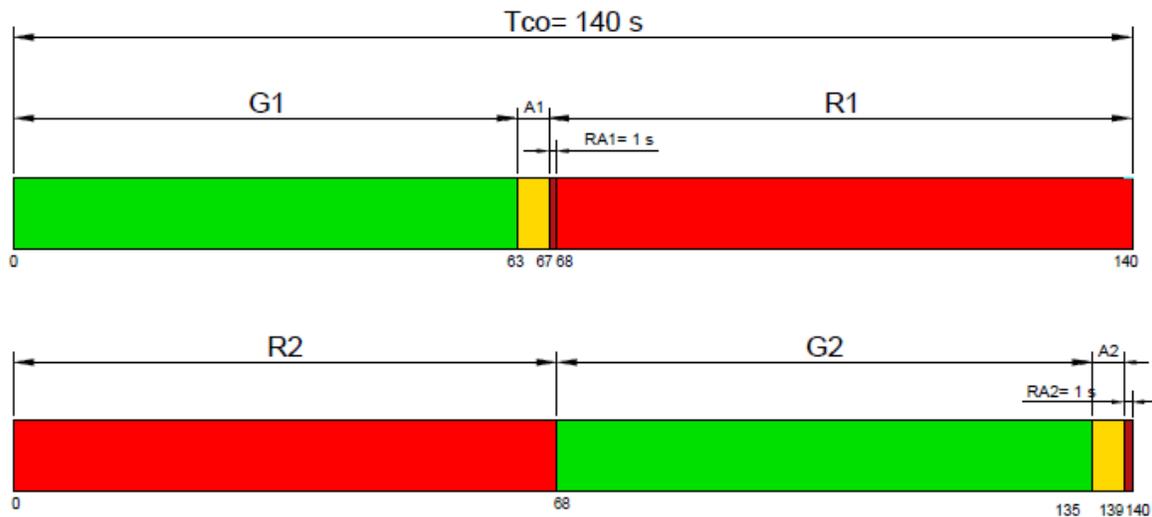
4.- Calcular los tiempos de rojo

Finalmente, ya con todos los tiempos efectivos calculados y recordando que el ciclo total tendrá una duración de 140 segundos con un ámbar de 4 segundos, bastará con realizar una resta para determinar el tiempo de rojo.

$$R1 = 140 - 63 - 4 = \mathbf{73\ s}$$

$$R2 = 140 - 67 - 4 = 69 \text{ s}$$

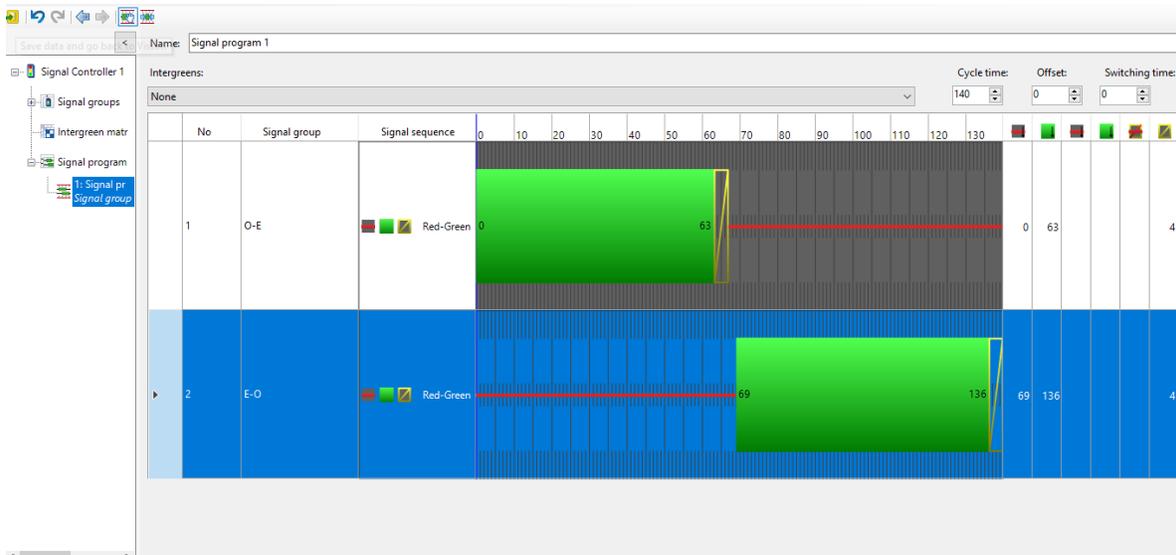
La **imagen 30** muestra el diagrama de las fases para la intersección de este proyecto



**Imagen 30:** Diagrama de fases para la intersección (Elaboración propia).

Con esta información se pudo realizar la programación de semáforos en el software apoyándose en la función llamada “Control semafórico”. Recordando que la información de los volúmenes de tránsito, la ubicación de las salidas de vehículos y las rutas, se mantuvieron tal cual se indicó en el apartado **3.3 Estado actual de la intersección**.

Para insertar estos datos se hizo uso de la herramienta “control semafórico”, donde se insertó un “signal group” con las dos fases y posteriormente se programaron las duraciones en base a lo obtenido en la tabla anterior, **imagen 31**.



**Imagen 31:** Programación semafórica en PTV Vissim (Elaboración propia).

### 3.5 Propuesta 2: Modificación geométrica

La última de las propuestas consiste en realizar una modificación geométrica de la intersección, aquí la glorieta quedó cancelada y se implementaron dos retornos a 85 metros de cada lado de la ubicación original de la glorieta.

Para esto, se propone la implementación de carriles de desaceleración los cuales tienen una longitud de 35 m, esto con el propósito de canalizar los vehículos que harán un giro en un carril a parte y que no generen conflictos en el resto de los carriles.

La **imagen 32** muestra el modelo de la nueva geometría del camino con las intersecciones.



**Imagen 32:** Modelado de nueva propuesta geométrica del camino (Elaboración propia).

De igual forma que en los casos anteriores, se respetó el volumen vehicular y la ubicación de las salidas de vehículos, solamente alterando la distancia recorrida para los movimientos que harán un giro.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados de la simulación

Una vez que quedaron definidos y modelados los escenarios, se procedió a realizar la simulación en el software, dicha simulación se realizó un total de **5 veces** para de esta forma promediar y obtener un resultado más objetivo.

El principal parámetro a evaluar y conocer la propuesta más eficiente será el tiempo de viaje vehicular. Esta función viene incluida en el software y sirve para conocer cuánto tiempo se tardan en promedio los vehículos en recorrer una ruta definida.

En el caso de este proyecto, se evaluó el boulevard Emiliano Zapata con sus recorridos de Este a Oeste y viceversa. A continuación, se muestran los resultados en cada uno de los escenarios.

Las rutas que se consideran en los parámetros de simulación son:

- Este a Oeste
- Oeste a Este
- Sur a Este
- Este a Sur
- Sur a Oeste

**NOTA:** La ruta de Oeste a Sur no se tomó en cuenta debido a que está antes de la intersección y no se ve afectada por la misma.

Para interpretar los resultados que arrojan las tablas del simulador se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Se realizaron 5 simulaciones por cada escenario, la columna de nombre **“SimRun”** indica el número de simulación, mientras que **“VehicleTravelTimeMeasurement”** la dirección de la ruta.

La columna **“Vehs(todos)”** indica el total de vehículos que transitaron por dicha ruta a lo largo de la simulación en turno, la columna **“TravTm(todos)”** muestra el tiempo de viaje de la ruta y finalmente **“DistTrav(todos)”** la distancia que recorre el conductor.

## SITUACIÓN ACTUAL:

Para este estudio solamente se hará énfasis en la columna “*TravTm(todos)*” que es el tiempo de viaje, es decir, el tiempo promedio que le tomó a todos los vehículos transitar por una ruta, esta unidad de tiempo está expresada en segundos.

Los datos que se encuentran encerrados en la **tabla 13** son el resultado del tiempo que le toma transitar una ruta determinada al conductor. Para la situación actual, la ruta Sur-Oeste arrojó el valor más elevado en la simulación numero 1 siendo de 242.18 segundos, incluso no terminó el recorrido en las siguientes cuatro simulaciones.

Esto se debe que los vehículos que vienen de la parte sur (calle 21 de marzo) deben tomar la glorieta para incorporarse al boulevard en dirección oeste, y como se ha visto a lo largo de este proyecto, se ocasiona congestionamiento en dicha intersección impidiendo el libre tránsito a los vehículos que vienen de esta dirección.

Por otra parte, en la segunda simulación con dirección Este-Oeste se presentó el menor tiempo de viaje, siendo de solamente 31.39 segundos. En esta ruta los vehículos pasan recto por el boulevard, por lo que al tomar el carril derecho pierden menos tiempo en comparación de los que toman el izquierdo para realizar algún giro.

Esta situación se repite de forma menos drástica en el resto de simulaciones, todo lo anterior se muestra en la **tabla 13**.

**Tabla 13:** Resultados de la situación actual (Elaboración propia).

Conteo: 45	SimRun	TimeInt	VehicleTravelTimeMeasurement	Vehs(todos)	TravTm(todos)	DistTrav(todos)
1	1	0-4200	1: Blvd. E-O	128	49.15	297.45
2	1	0-4200	2: Blvd. O-E	134	78.45	321.17
3	1	0-4200	3: S-E	26	84.92	252.64
4	1	0-4200	4: E-S	0		
5	1	0-4200	5: S-O	2	242.18	280.53
6	2	0-4200	1: Blvd. E-O	199	31.39	297.45
7	2	0-4200	2: Blvd. O-E	177	45.95	321.17
8	2	0-4200	3: S-E	27	174.62	252.64
9	2	0-4200	4: E-S	4	48.12	237.96
10	2	0-4200	5: S-O	0		
11	3	0-4200	1: Blvd. E-O	200	34.96	297.45
12	3	0-4200	2: Blvd. O-E	172	58.19	321.17
13	3	0-4200	3: S-E	14	120.44	252.64
14	3	0-4200	4: E-S	6	113.88	237.96
15	3	0-4200	5: S-O	0		
16	4	0-4200	1: Blvd. E-O	194	41.21	297.45
17	4	0-4200	2: Blvd. O-E	141	72.01	321.17
18	4	0-4200	3: S-E	5	210.30	252.64
19	4	0-4200	4: E-S	5	161.65	237.96
20	4	0-4200	5: S-O	0		
21	5	0-4200	1: Blvd. E-O	170	35.53	297.45
22	5	0-4200	2: Blvd. O-E	192	60.77	321.17
23	5	0-4200	3: S-E	4	214.46	252.64
24	5	0-4200	4: E-S	6	211.66	237.96
25	5	0-4200	5: S-O	1	45.14	280.53
26	Average	0-4200	1: Blvd. E-O	178	38.45	297.45

## IMPLEMENTACIÓN DE SEMÁFOROS:

Para este escenario se puede apreciar que el tiempo de viaje en las distintas rutas incrementó considerablemente respecto al estado actual de la intersección.

En esta ocasión gracias al semáforo ubicado en el boulevard con dirección hacia el Este, le permitió a la ruta Sur-Oeste terminar de simular los vehículos que la transitan, en el escenario anterior la mayoría de estos resultados estaban en blanco debido a que demoraban tanto tiempo que el software no alcanzaba a generar los resultados.

Sin embargo, el resto de rutas se vio afectada ya que se generan colas muy grandes y solamente beneficia a muy pocas rutas como es el caso de la ruta Este-Sur, tomando como ejemplo su cuarta simulación: En el escenario anterior recorrerla tomaba un tiempo de 161.65 segundos, mientras que en este solamente son 56.53 segundos. Las rutas beneficiadas con esta modificación son la Este-Sur, Sur-Oeste y Sur-Este.

No obstante, dichas rutas contienen un volumen de tránsito muy pequeño ya que Este-Sur solo representa el 5% de vehículos que transitan en el boulevard, mientras que Sur-Oeste y Sur-Este forman parte de la misma calle con menor volumen de tránsito obtenido siendo solo de 655 vehículos/hora.

La ruta Oeste-Este y Este-Oeste tienen volúmenes de tránsito superiores, 1505 y 1487 respectivamente, por lo que estas dos rutas son las que deben ver una reducción considerable en su tiempo de viaje, siendo todo lo contrario en este escenario por lo cual no resulta ser el más conveniente.

Estos datos se encuentran en la **tabla 14**, en la columna **“TravTm(todos)”** donde se muestra lo descrito anteriormente en el resto de las simulaciones.

**Tabla 14:** Resultados al semaforizar (Elaboración propia).

Conteo: 45	SimRun	TimeInt	VehicleTravelTimeMeasurement	Vehs(todos)	TravTm(todos)	DistTrav(todos)
1	1	0-4200	1: E-O	168	79.28	298.47
2	1	0-4200	2: O-E	125	98.41	320.38
3	1	0-4200	3: S-E	60	67.76	252.31
4	1	0-4200	4: E-S	12	91.14	239.10
5	1	0-4200	5: S-O	3	84.75	280.48
6	2	0-4200	1: E-O	189	78.76	298.47
7	2	0-4200	2: O-E	117	95.33	320.38
8	2	0-4200	3: S-E	51	78.80	252.31
9	2	0-4200	4: E-S	7	78.41	239.10
10	2	0-4200	5: S-O	0		
11	3	0-4200	1: E-O	187	76.29	298.47
12	3	0-4200	2: O-E	146	93.34	320.38
13	3	0-4200	3: S-E	72	79.35	252.31
14	3	0-4200	4: E-S	11	87.76	239.10
15	3	0-4200	5: S-O	4	88.66	280.48
16	4	0-4200	1: E-O	184	64.35	298.47
17	4	0-4200	2: O-E	139	105.59	320.38
18	4	0-4200	3: S-E	75	73.14	252.31
19	4	0-4200	4: E-S	8	56.53	239.10
20	4	0-4200	5: S-O	2	112.08	280.48
21	5	0-4200	1: E-O	183	55.40	298.47
22	5	0-4200	2: O-E	142	100.89	320.38
23	5	0-4200	3: S-E	74	64.09	252.31
24	5	0-4200	4: E-S	13	58.54	239.10
25	5	0-4200	5: S-O	6	69.10	280.48

## MODIFICACIÓN GEOMÉTRICA DEL CAMINO:

Los resultados del último escenario fueron los más favorables, donde los tiempos de viaje redujeron en la mayoría de las rutas.

Estos tiempos se han reducido en promedio un 30%, aunque hay casos como la ruta Este a Sur, donde la distancia de viaje aumentó, esto debido a que antes se usaba la glorieta para acceder a la calle 21 de marzo, y en esta propuesta para girar a dicha calle, se necesita usar los nuevos retornos propuestos, lo que implica realizar un recorrido de distancia mayor. Esto aparentemente podría indicar que el tiempo de viaje subiría de forma considerable ya que se aumentó la distancia a recorrer, sin embargo, el tiempo se ve reducido ya que los vehículos que realizarán un giro no se quedan esperando en el carril izquierdo, sino que son canalizados en los carriles de desaceleración e incorporación.

Estos carriles permiten un mejor flujo vehicular, permitiendo a los automóviles que van recto, seguir su camino sin necesidad de frenar o detener el auto. El resultado fue bastante favorable para las rutas Este-Oeste y Oeste-Este que, como se mencionó anteriormente, son las que llevan los mayores volúmenes vehiculares, por lo que si van de forma fluida no ocasionarán congestionamientos en el resto del camino.

Los resultados se muestran en la **tabla 15**, destacando en la columna **“TravTm(todos)”** como estos tiempos de viaje han disminuido.

**Tabla 15:** Resultados al semaforizar (Elaboración propia).

Conteo: 45	SimRun	TimeInt	VehicleTravelTi...	Vehs(todos)	TravTm(todos)	DistTrav(todos)
1	1	0-4200	1: E-O	22	17.82	295.56
2	1	0-4200	2: O-E	21	21.65	329.77
3	1	0-4200	3: S-E	8	30.08	252.21
4	1	0-4200	4: E-S	1	56.49	341.39
5	1	0-4200	5: S-O	5	55.17	398.55
6	2	0-4200	1: E-O	21	17.75	295.56
7	2	0-4200	2: O-E	21	20.73	329.77
8	2	0-4200	3: S-E	8	28.30	252.21
9	2	0-4200	4: E-S	9	45.98	341.39
10	2	0-4200	5: S-O	2	61.91	398.55
11	3	0-4200	1: E-O	22	17.64	295.56
12	3	0-4200	2: O-E	23	21.02	329.77
13	3	0-4200	3: S-E	9	32.17	252.21
14	3	0-4200	4: E-S	1	51.99	341.39
15	3	0-4200	5: S-O	6	54.28	398.55
16	4	0-4200	1: E-O	22	17.95	295.56
17	4	0-4200	2: O-E	22	20.81	329.77
18	4	0-4200	3: S-E	10	27.58	252.21
19	4	0-4200	4: E-S	1	44.20	341.39
20	4	0-4200	5: S-O	2	54.53	398.55
21	5	0-4200	1: E-O	19	17.40	295.56
22	5	0-4200	2: O-E	22	20.94	329.77
23	5	0-4200	3: S-E	8	25.04	252.21
24	5	0-4200	4: E-S	1	44.88	341.39
25	5	0-4200	5: S-O	6	49.82	398.55

Las imágenes 33, 34 y 35 muestran cómo se comporta el flujo vehicular en cada una de las propuestas aplicadas en Vissim:

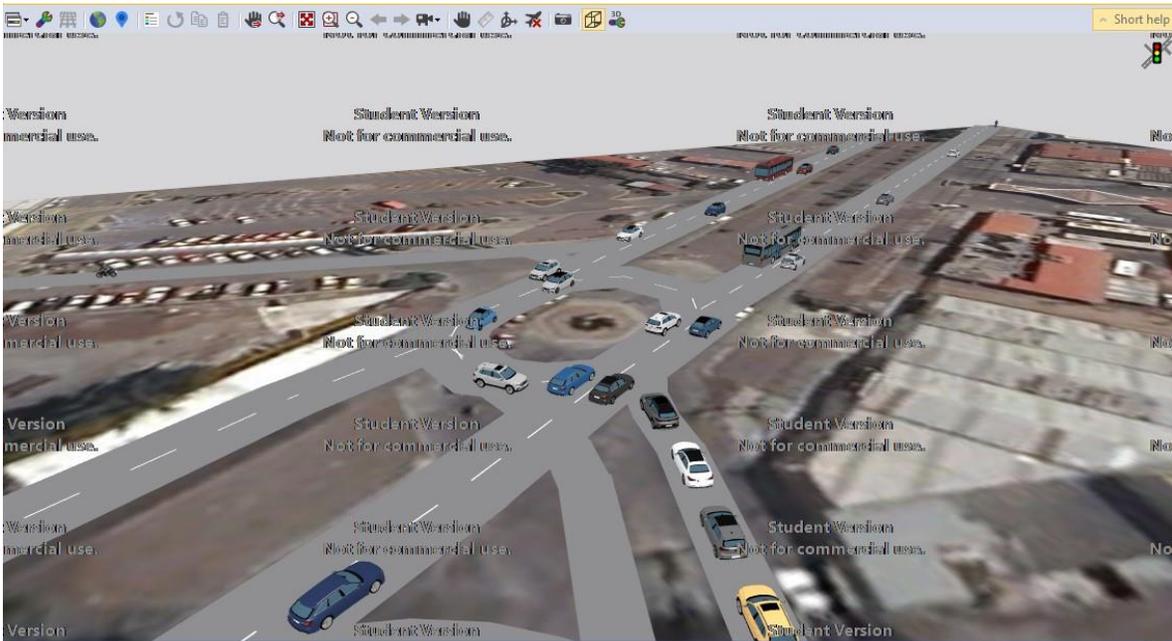


Imagen 33: Simulación de intersección en su estado actual (Elaboración propia).

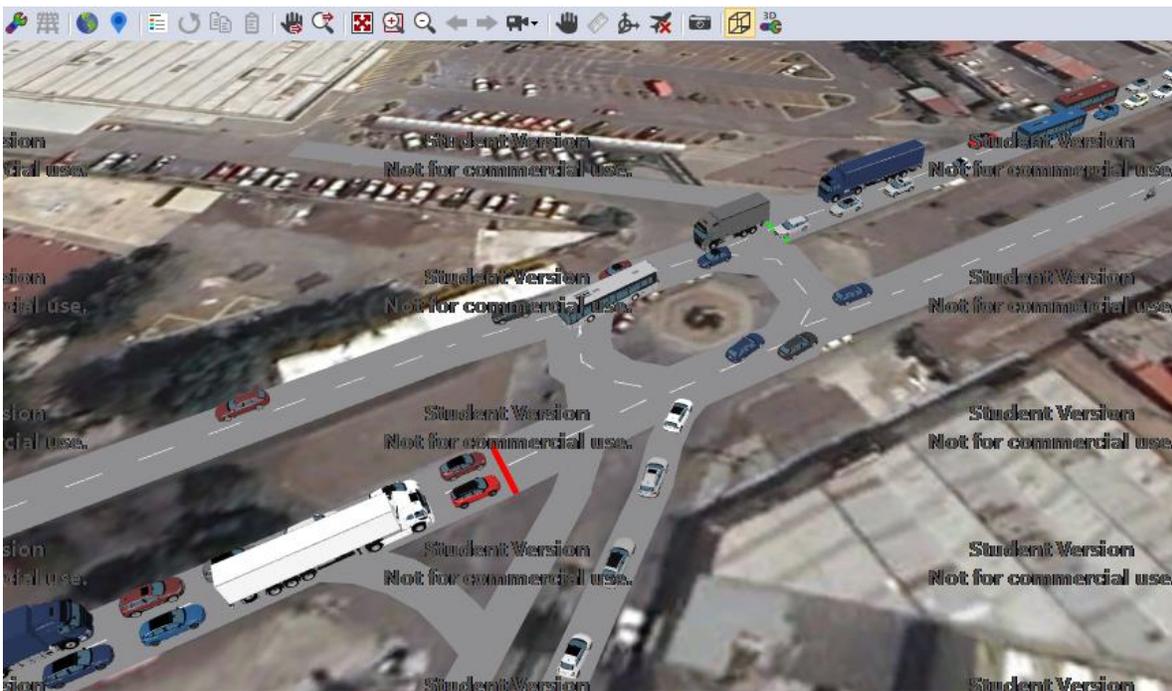
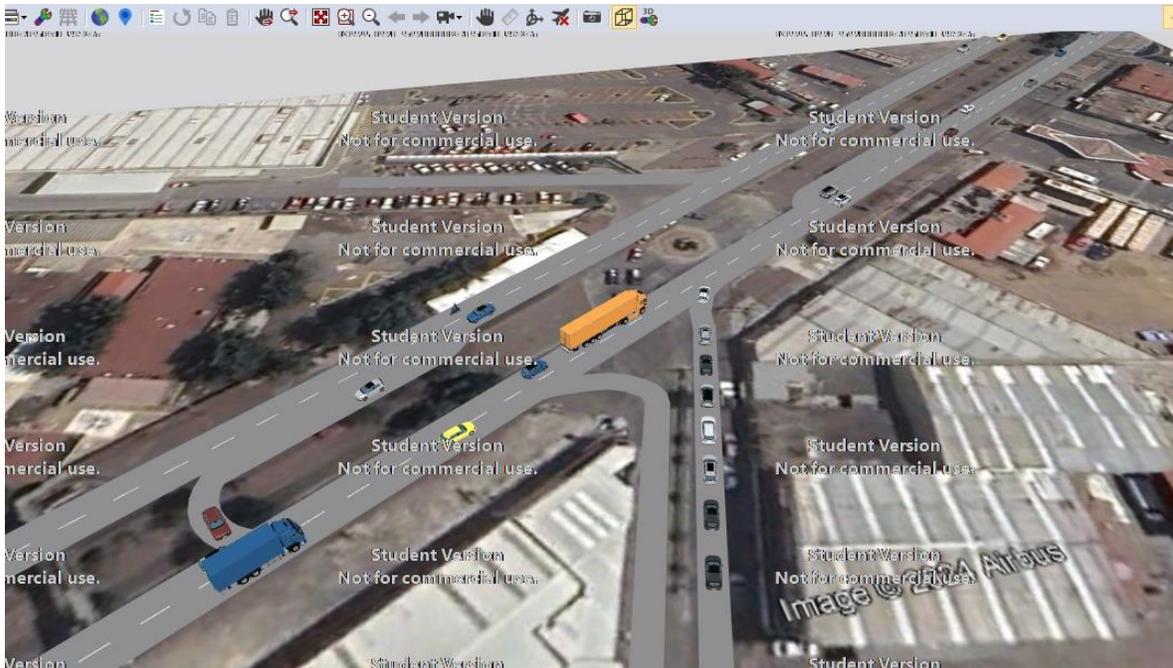


Imagen 34: Simulación de intersección con semáforos (Elaboración propia).



**Imagen 35:** Simulación de intersección tras modificar su geometría (Elaboración propia).

El flujo vehicular vio una mejora respecto al escenario actual y al de la semaforización. Si bien este último permite descongestionar un poco la zona, crea colas muy largas de vehículos.

Los resultados fueron ordenados y promediados entre las cinco simulaciones realizadas para posteriormente realizar una comparación entre los tres escenarios tal y como se muestra en la **tabla 16**.

**Tabla 16:** Comparación de los resultados (Elaboración propia).

Tiempo de viaje vehicular promedio (s)		Situación actual (s)	Semáforos (s)	Modificación geométrica (s)
Ruta	Este a Oeste	38.45	70.82	17.712
	Oeste a Este	63.07	99.33	21.03
	Sur a Este	160.95	72.63	28.634
	Este a Sur	133.83	74.48	48.708
	Sur a Oeste	143.66	88.65	55.142

Estos datos representan el promedio del tiempo de viaje que le toma a un conductor recorrer una ruta, por lo cual, si el tiempo es muy alto, quiere decir que el conductor tardará mucho en transitar dicha ruta.

Tomando como ejemplo la ruta Este a Oeste de la tabla se muestra que, actualmente durante la hora de máxima demanda, a un conductor le toma en promedio 38.45 segundos recorrer dicha ruta. Si se implementan semáforos, le tomaría 70.80 segundos, mientras que en la modificación geométrica solo le tomará 17.712 segundos.

Este comportamiento se repite en las demás rutas, demostrando que la opción más rápida es el caso número 3.

#### 4.2 Discusión

Gracias a la implementación de herramientas como los softwares de simulación se puede realizar un estudio previo a la realización de un proyecto vial para conocer su comportamiento y tomar mejores decisiones.

Como se mencionó en el apartado **2.5.3 Casos de estudio con PTV Vissim**, este software fue utilizado para realizar un análisis a la problemática de congestión vehicular en una intersección ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia y para realizar un análisis a las longitudes de colas para casetas de cuota en autopistas de México.

La principal problemática de la glorieta ubicada en la calle 60 con calle 63 de Bogotá era el alto volumen vehicular en ciertas franjas horarias, lo que ocasionaba demoras en la circulación de vehículos (Sierra, 2021). En este caso de estudio la problemática es bastante similar, ya que las demoras ocasionadas por el congestionamiento vial en la intersección de “El Caballito” fueron el punto de partida de esta investigación. Pese a que son casos similares, una gran distinción es que la glorieta de las calles 60 y 63 si cumple con las características geométricas para ser considerada una glorieta (Sierra, 2021), mientras que en este proyecto no es así.

Por otra parte, la investigación realizada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) estuvo enfocado en analizar y reducir las longitudes de cola en autopistas de México, específicamente en la plaza de cobro de la autopista México-Querétaro (Acha, Moreno, & Martínez, 2020), aunque el enfoque parece ser distinto, habrá que recordar que una de las causas por las que se forman largas colas de vehículos, es por el tiempo que les demora transitar por un punto en específico, este tipo de situaciones se pueden analizar por medio de un simulador de tránsito para realizar propuestas que den una mejora total o parcial al problema (González, 2020).

Respecto a la recapitulación de la información, para realizar el estudio de tránsito en la glorieta de Colombia, el autor, realizó los aforos vehiculares en su respectiva intersección para determinar su Volumen Horario de Máxima demanda (VHMD) siendo que su hora pico abarca desde las 17:30 horas a las 18:30 horas con un volumen de 7391 veh/hora. Por otra parte, la intersección de este proyecto presenta las horas con máxima demanda siendo desde las 12:30 horas hasta las 15:30 horas, teniendo su pico máximo en el intervalo de 13:15 a 13:30 horas teniendo un flujo vehicular de 3647 automóviles, específicamente en los días jueves, al realizar esta metodología de intervalos a cada 15 minutos como lo indica el autor (Cal y Mayor, 2018) se puede observar de manera más precisa cual es el intervalo de tiempo con mayor flujo vehicular dentro de las horas pico.

Una vez que se obtienen los datos en campo, el siguiente paso es vaciarlos en el software para posteriormente indicarle que hacer con esa información, el caso de la

autopista México-Querétaro se buscaba simular una situación actual del comportamiento de las colas generadas en las casetas de cobro para posteriormente comparar los resultados de la simulación de distintos escenarios propuestos y conocer cuál es el más favorable respecto al original (Acha, Moreno, & Martínez, 2020) que en esencia es un caso cuyo objetivo es similar a este proyecto, donde se buscó reducir los tiempos de viaje, indirectamente también redujeron las colas generadas en el Boulevard Emiliano Zapata, ya que al causar menos atascos generados por la intersección, los vehículos fluyen de manera más libre, como se muestra en los videos del simulador, presentando longitudes de cola muy pequeñas a lo largo del Boulevard y la calle 21 de Marzo .

Finalmente, en el apartado de los resultados, en la intersección de Bogotá, se obtuvo un promedio de demora de 45 segundos en su estado original, tras la modificación propuesta se vio una mejora significativa reduciendo 44% (Sierra, 2021), mientras que para en este proyecto los resultados redujeron 30% respecto a la situación actual. El caso de estudio de la autopista México-Querétaro también vio resultados favorables, al reducir sus longitudes de cola al 55% en el cuarto de sus cinco escenarios propuestos (Acha, Moreno, & Martínez, 2020).

Todos estos trabajos implementaron el uso de PTV Vissim, aunque el enfoque solía variar en algunos aspectos, se demuestra que el uso de softwares de simulación ayuda a visualizar distintos escenarios y mostrar resultados satisfactorios como la reducción en tiempos de demoras, tiempos y longitudes de colas, entre otros problemas relacionados a la congestión vial siendo alternativas sumamente viables para problemáticas similares que hay en México y en el mundo.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN

Tras realizar todas las simulaciones de tránsito, las posibles soluciones tenían como objetivo optimizar el flujo vehicular para reducir el tiempo que le toma al conductor pasar por esta sección de la carretera.

La opción de semaforizar la intersección arrojó los peores resultados, ya que el tiempo para transitar aumentan considerablemente, en promedio medio minuto para ambas direcciones, por lo que esta solución quedaría totalmente descartada.

En el tercer escenario se propuso realizar una modificación geométrica del camino, clausurando la intersección que funcionaba como glorieta e implementando dos retornos a una distancia cercana a donde solía estar la intersección (aproximadamente 90 metros). Los resultados de esta propuesta fueron bastante positivos ya que los tiempos de viaje se redujeron drásticamente respecto a la situación actual, tomando como ejemplo el tiempo de recorrido más largo (Sur a Este) pasando de 161 segundos a 27, redondeando las cifras, o en la vía más transitada que es de Oeste a Este, pasando de 38 segundos a 17. Esto puede ser debido a la implementación de los carriles de desaceleración los cuales canalizan a los vehículos que realizarán algún movimiento y dejan el paso libre a los que transitan de forma recta.

Con todos los resultados obtenidos se puede enumerar de la siguiente forma la eficiencia de los distintos escenarios, siendo el 1 el más favorable y el 3 el menos:

1. Modificación geométrica
2. Situación actual
3. Implementación de semáforos

Como se pudo observar, la modificación geométrica arrojó los mejores resultados, reduciendo los tiempos de viaje al transitar por el boulevard respecto a la situación actual tal y como se demostró en el apartado 4.1 Resultados de simulación.

Recordando el objetivo general de este trabajo de investigación (Indicado en el apartado **1.5.1 Objetivo general**) y con los resultados obtenidos del mejor escenario, se puede demostrar que dicho objetivo fue cumplido, ya que se propuso un escenario donde el tiempo de viaje y el flujo vehicular vieron una mejora notable.

Al mismo tiempo, en el desarrollo de este proyecto se fueron cumpliendo uno a uno los objetivos específicos (Mencionados en el apartado **1.5.2 Objetivos específicos**) y a su vez las metas propuestas (apartado **1.5.3 Metas**).

Este proyecto demostró con ayuda de PTV Vissim, lo planteado en la hipótesis, que es posible reducir el congestionamiento vial mediante una propuesta de modificación a la geometría de la intersección, la cual ayudó a reducir tiempos de viaje a los automovilistas que transitan por el Boulevard Emiliano Zapata, que a su vez genera una disminución del congestionamiento vial.

Para concluir, se describen algunas de las limitaciones que surgieron al realizar este estudio, las cuales podrían modificar los resultados:

**Software:** Al tratarse de una versión de estudiante se encuentran limitadas ciertas herramientas como el tiempo de simulación, que es solamente de un par de horas, con una versión completa se podría simular hasta un día completo.

**Duración de aforos:** Como se describió en el apartado *3.2 Realización de aforos vehiculares* solamente se tomaron en cuenta tres días en sus horas pico, por lo que no se obtuvieron resultados en el resto del día y la semana.

**Método de aforo:** Al tratarse de un método manual y una vía con alto flujo vehicular existe el error humano, por lo que podría haber una variación en los volúmenes de tránsito a que, si estos fueran realizados por algún medio automático como cámaras o escáner, ya que con estos la información sería un poco más precisa.

## Bibliografía

- Acha, J., Moreno, M., & Martínez, J. (2020). *Análisis de colas en autopistas de cuota en México*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt609.pdf>
- Borja Moreno. (27 de Enero de 2016). *Ingeniería de tránsito y sus herramientas de modelización*. Obtenido de EADIC: <https://eadic.com/blog/entrada/ingenieria-de-transito-y-sus-herramientas-de-modelizacion/>
- Cal y Mayor, R. (2018). *Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones*. México: Alfaomega.
- Córdoba, J. (2014). *Volumen de tránsito*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/marco11390/volumen-de-transito>
- Cuéllar, M., & Beltrán, P. (Junio de 2020). *Caracterización de flujos vehiculares en intersecciones viales de Bogotá, Colombia*. Obtenido de Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1176/Cu%20a9llar%20Sarmiento%20Miguel%20c3%81ngel-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- DOF. (14 de Noviembre de 2014). *NOM-012-SCT-2-2014*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5368355&fecha=14/11/2014#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5368355&fecha=14/11/2014#gsc.tab=0)
- González, J. (1 de julio de 2020). *Herramienta de modelado de carreteras para simuladores de tráfico*. Obtenido de Universidad de la Laguna: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/20606/Herramienta%20de%20modelado%20de%20carreteras%20para%20simuladores%20de%20trafico.pdf?sequence=1>
- Gordillo, D. (2018). *Determinación de los factores de mayoración del tránsito promedio diario anual (TPDA) partiendo de datos históricos de zonas representativas de la ciudad de Cuenca*. Obtenido de Universidad de Cuenca: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30317/1/Trabajo%20de%20titulaci%C3%B3n.pdf>
- GROUP, P. (2023). *PTV GROUP*. Obtenido de PTV Vissim: <https://www.ptvgroup.com/es/soluciones/productos/ptv-vissim-nuevo/>
- HCM. (2010). *Highway Capacity Manual Volume 3: Interrupted flow*. Washington DC: Transportation research board.
- Hernández, L. (20 de Octubre de 2023). *¿Cuántos autos existen en el mundo y en que regiones hay más?* Obtenido de AS México: <https://mexico.as.com/motor/cuantos-autos-existen-en-el-mundo-y-en-que-regiones-hay-mas-n/>
- IMIP. (2012). *Nodos de conflicto vial en el municipio de Pachuca de Soto*. Obtenido de Ayuntamiento de Pachuca: <https://imip.pachuca.gob.mx/estudios/Nodos.pdf>
- INEGI. (2020). *Censo de población y vivienda*. Obtenido de INEGI: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/poblacion/>

- INEGI. (2020). *Clima en Hidalgo*. Obtenido de INEGI:  
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/clima.aspx?tema=me&e=13#:~:text=La%20temperatura%20media%20anual%20es,es%20de%20800%20m%20anuales.>
- INEGI. (2021). *Parque vehicular*. Obtenido de INEGI:  
[https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/#Informacion\\_general](https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/#Informacion_general)
- Ingartek Consulting. (21 de Junio de 2019). *Ingartek*. Obtenido de La importancia de la simulación de tráfico: <https://www.ingartek.com/es/la-importancia-de-la-simulacion-de-trafico/#:~:text=Una%20simulaci%C3%B3n%20de%20tr%C3%A1fico%20puede,campa%C3%B1a%20de%20informaci%C3%B3n%20al%20p%C3%BAblico.>
- Jerez, Á. (Febrero de 2015). *Análisis del nivel de servicio y capacidad vehicular de las intersecciones con mayor demanda en la ciudad de Azogues*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7704/1/UPS-CT004571.pdf>
- Leython, R. (19 de Enero de 2022). *Intersecciones a desnivel*. Obtenido de Vías PUCP:  
<http://blog.pucp.edu.pe/blog/viaspucp/2022/01/19/intersecciones-a-desnivel/>
- López, R. (2018). *Ingeniería de tránsito, gestión de la movilidad y la seguridad vial*. Ciudad de México: Flores.
- Luna, Ó. (20 de Septiembre de 2016). *Colima, 5° lugar con más autos per cápita*. Obtenido de Perriodismo: <https://www.perriodismo.com.mx/2016/09/20/colima-5-lugar-con-mas-autos-per-capita/>
- Mc Trans. (14 de Diciembre de 2022). *Transportation Institute University of Florida*. Obtenido de HCS 2023 Release: <https://mctrans.ce.ufl.edu/highway-capacity-software-hcs/>
- Mendoza Galán, C. A. (2017). *Evaluar las medidas de rendimiento óptimos de los semáforos ubicados en los alrededores de las rotondas Centroamérica y Jean Paul Genie, para calcular un ciclo común que permitan agilizar la circulación y mejorar la operatividad entre ellas*. Obtenido de Repositorio Centroamericano SIIDCA-CSUCA:  
<https://repositoriosiidca.csuca.org/Record/RepoUNANM8784#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20Webster%20es%20un,un%20ciclo%20m%C3%ADnimo%20de%20funcionamiento.>
- Mendoza, J. (2015). *Propuesta metodológica para justificar la construcción de intersecciones a desnivel*. Obtenido de Instituto Mexicano del Transporte:  
<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt436.pdf>
- Misari, L. (2020). *Capacidad vial y flujo vehicular en la carretera PE. 3SB*. Obtenido de Universidad Peruana Los Andes: <https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/2825>
- Mozo, J. (2011). *Análisis de nivel de servicios y capacidad de segmentos básicos de autopistas, segmentos trenzados y rampas de acuerdo al manual de capacidad de carreteras HCM2000 aplicando MathCad*. Obtenido de UNAM:  
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/analisis-de-nivel-de-servicio-y-capacidad-de->

segmentos-basicos-de-autopistas-segmentos-trenzados-y-rampas-de-acuerdo-a-3541577?c=LPwgZp&d=false&q=\*&i=9&v=1&t=search\_0&as=0

Radelat, G. (2003). *Principios de ingeniería de tránsito*. Washington DC: Instituto de Ingenieros de Transporte.

*Reglamento de movilidad y transporte*. (30 de Marzo de 2020). Obtenido de Periódico oficial del Estado de Hidalgo: <https://periodico.hidalgo.gob.mx/?p=37306>

Rodríguez, N. (2015). Evaluación del congestionamiento vehicular en intersecciones viales. *Cultura Científica y Tecnológica*. Obtenido de Evaluación del congestionamiento vehicular en intersecciones viales.

S.M. (28 de Marzo de 2023). *ABC Motor*. Obtenido de La grave sanción a la que te enfrentas si accedes mal a una glorieta: <https://www.abc.es/motor/reportajes/grave-sancion-enfrentas-accedes-mal-glorieta-20230329134420-nt.html>

SCT. (2016). *Manual para obtener los volúmenes de tránsito en carreteras*. Obtenido de Secretaría de Comunicaciones y Transporte:  
[https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual\\_volumen\\_de\\_transito/Manual\\_volumenes\\_\\_2016\\_v2.pdf](https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual_volumen_de_transito/Manual_volumenes__2016_v2.pdf)

SCT. (Julio de 2018). *Manual de proyecto geométrico de carreteras*. Obtenido de Secretaría de Comunicaciones y Transporte:  
[https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC\\_2018\\_16\\_11\\_18.pdf](https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/manual-pg/MPGC_2018_16_11_18.pdf)

SCT. (2021). *Capacidad y niveles de servicio en la red carretera*. Obtenido de <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/capacidades-y-niveles-de-servicio/>

SCT. (2023). *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*. Obtenido de Secretaría de Comunicaciones y Transporte:  
[https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual\\_de\\_se%C3%B1alizaci%C3%B3n\\_y\\_dispositivos\\_para\\_el\\_control\\_de\\_transito/Manual\\_se%C3%B1alizaci%C3%B3n.pdf](https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_se%C3%B1alizaci%C3%B3n_y_dispositivos_para_el_control_de_transito/Manual_se%C3%B1alizaci%C3%B3n.pdf)

Secretaría de Servicios Parlamentarios. (17 de Mayo de 2022). *Ley general de movilidad y seguridad vial*. Obtenido de <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGMSV.pdf>

SIDRA Solutions. (2023). *SIDRA Intersection*. Obtenido de Software de ingeniería:  
<https://www.softwaredeingenieria.es/sidra/sidra-intersection/>

Sierra, N. (2021). *Análisis funcional de la glorieta de la Calle 63 con carrera 60 con el softawe PTV Vissim*. Obtenido de Universidad Católica de Colombia:  
<https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/24d79535-e8c8-4e10-abc7-3105100d70ae/content>

SUMO. (2018). *Simulación de trafico usando SUMO*. Obtenido de Eclipse:  
<https://www.eclipse.org/sumo/about/>

- Uribe, S. (23 de Octubre de 2009). *Propuesta metodológica para el diseño de intersecciones urbanas*. Obtenido de INVENTUM:  
<https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Inventum/article/view/129/122>
- Verdezoto, A. (2020). Análisis del congestionamiento vehicular para el mejoramiento de vía principal en Guayaquil-Ecuador. *Gaceta técnica*, 2.
- Zamarrón, H. (11 de Enero de 2024). *CDMX, segunda entidad en el mundo con más pérdida de tiempo en el tráfico: Índice Global*. Obtenido de Milenio:  
<https://www.milenio.com/politica/comunidad/cdmx-segunda-entidad-en-el-mundo-con-mas-perdida-de-tiempo-de-traffic#:~:text=Ranking%20de%20tr%C3%A1fico%202023&text=Tabla%20con%203%20columnas%20y%2015%20filas.&text=El%20d%C3%ADa%20con%20el%20peor,fue%20el%20V>