Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Industrial
Unidad de Posgrado

Implementación de semáforos inteligentes para reducir el tráfico vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ingeniería Industrial

AUTOR

Christian Renatto TORRES CHUNG

ASESOR

Dr. Paulo César OLIVARES TAIPE

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Torres, C. (2026). *Implementación de semáforos inteligentes para reducir el tráfico vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ingeniería Industrial, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Christian Renatto Torres Chung
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70902420
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-0820-2166
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Paulo César Olivares Taipe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10288397
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-9989-0709
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Enrique Ortiz Porras
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	40523944
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Inche Mitma
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07506203
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rosa Karol Moore Torres
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	31680729
Datos de investigación	
Línea de investigación	9. Desarrollo de modelos y aplicación de las tecnologías de información y comunicaciones. ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico. C.19.0.9

Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: San Miguel Lugar: Cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett Latitud: -12.0744 Longitud: -77.0996 País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: San Miguel Lugar: Cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó Latitud: -12.0774 Longitud: -77.0933
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Abril 2024 – diciembre 2025
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería del transporte: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.05 Sistemas de automatización, sistemas de control: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.03

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
Dirección General de Estudios Posgrado
Dirección de Normalización y Evaluación

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú, Decana de América
Facultad de Ingeniería Industrial
Vicedecanato de Investigación y Posgrado - Unidad de Posgrado

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Siendo las 11:00 horas del día viernes diecisiete de abril de dos mil veintiséis en la sala grados, el Jurado de Tesis conformado por los siguientes docentes:

Presidente	:	**DR. JORGE ENRIQUE ORTIZ PORRAS**
Miembro	:	**DR. JORGE LUIS INCHE MITMA**
Miembro	:	**DRA. ROSA KAROL MOORE TORRES**
Asesor(a)	:	**DR. PAULO CÉSAR OLIVARES TAIPE**

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada: "**IMPLEMENTACIÓN DE SEMÁFOROS INTELIGENTES PARA REDUCIR EL TRÁFICO VEHICULAR ENTRE LA AV. ELMER FAUCETT Y LA AV. RIVA AGÜERO EN LA CIUDAD DE LIMA**", presentada por el(la) Bachiller **CHRISTIAN RENATTO TORRES CHUNG** egresado(a) del programa de posgrado: **MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL** desarrollado en la Unidad de Posgrado de la **FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**.

Concluida la sustentación, los miembros del Jurado de Tesis procedieron a formular sus preguntas las que fueron absueltas por el graduando(a); acto seguido se procedió con la evaluación correspondiente. En forma colegiada, el jurado asigno el calificativo de: diecisiete (17)
aprobado por logro

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Jurado Evaluador recomienda al Consejo de Facultad apruebe el otorgamiento del **GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL** a don(ña) **CHRISTIAN RENATTO TORRES CHUNG.**

Siendo las 12:00 horas, se levantó la sesión.

Se deja constancia del acto mediante las firmas del jurado de sustentación y asesor(a) de la tesis en la presente Acta:

DR. JORGE ENRIQUE ORTIZ PORRAS
Presidente

DR. JORGE LUIS INCHE MITMA
Miembro

DRA. ROSA KAROL MOORE TORRES
Miembro

DR. PAULO CÉSAR OLIVARES TAIPE
Asesor(a)

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **PAULO CESAR OLIVARES TAIPE** en mi condición de asesor acreditada mediante **DICTAMEN N°094-UPG-FII-2025** de la tesis, cuyo título es: "**IMPLEMENTACIÓN DE SEMÁFOROS INTELIGENTES PARA REDUCIR EL TRÁFICO VEHICULAR ENTRE LA AV. ELMER FAUCETT Y LA AV. RIVA AGÜERO EN LA CIUDAD DE LIMA",** presentado por el bachiller **CHRISTIAN RENATTO TORRES CHUNG** para optar el grado académico de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 1 1 **%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL.**

Lima, 17 de marzo de 2026



Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: **PAULO CESAR OLIVARES TAIPE**

DNI: **10288397**

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIA

A mi familia, por su constante apoyo y por acompañarme en cada etapa de este camino. A mis colegas y maestros, por contribuir a mi formación con sus conocimientos y experiencias. Y a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la oportunidad de seguir creciendo personal y profesionalmente.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
1.1. Situación Problemática 1
1.2. Definición del Problema 3
1.2.1 Problema General 3
1.2.2 Problemas Específicos 3
1.3. Justificación 4
1.3.1 Justificación Teórica 4
1.3.2 Justificación Práctica 4
1.3.3 Justificación Metodológica 5
1.4. Objetivos 6
1.4.1 Objetivo General 6
1.4.2 Objetivos Específicos 6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 7
2.1. Marco filosófico de la investigación 7
2.1.1 Ontología: Naturaleza del fenómeno estudiado 7
2.1.2 Axiología: Valores que orientan la investigación 7
2.2. Antecedentes del problema 7
2.2.1 Antecedentes Nacionales 7
2.2.2 Antecedentes Internacionales 15
2.3. Bases Teóricas 22
2.3.1 Calibración 22
2.3.2 Capacidad de la vía 22
2.3.3 Ciclo semafórico 23
2.3.4 Control adaptativo 23
2.3.5 Densidad de tráfico 23
2.3.6 Flujo de tráfico 23
2.3.7 Longitud de cola 24
2.3.8 Metodología del HCM 2022 24
2.3.9 Niveles de servicio 24
2.3.10 Predicción y simulación del tráfico 25
2.3.11 PTV Vissim 25

2.3.12 Semáforos Inteligentes 25
2.3.13 Tiempos de espera 29
2.3.14 Tiempos de luz semafórica 29
2.3.15 Tráfico Vehicular 29
2.3.16 Velocidad Vehicular 31
2.4. Glosario 31
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 33
3.1. Hipótesis General 33
3.2. Hipótesis Específicas 33
3.3. Identificación de variables 33
3.4. Operacionalización de variables 34
3.5. Matriz de Consistencia 36
3.6. Tipo y diseño de investigación 38
3.7. Unidad de análisis 40
3.8. Población de estudio 40
3.9. Tamaño de la muestra 41
3.10. Selección de la muestra 41
3.11. Técnicas de recolección de datos 41
3.12. Niveles de servicio 43
3.13. Análisis e interpretación de la información 45
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 46
4.1. Configuración general de las simulaciones en PTV Vissim 46
4.1.1 Construcción del modelo vial 47
4.1.2 Configuración de la semaforización fija 53
4.1.3 Configuración de la simulación 55
4.1.4 Exportación de los reportes 56
4.1.5 Conversión de archivo (.fzp) a MS Excel mediante Python* 57
4.1.6 Procesamiento de las métricas 58
4.2. Desarrollo del escenario adaptativo 60
4.3. Presentación de resultados y discusión por cruce 63
4.3.1 Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett 63
4.3.2 Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó 64
4.3.3 Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas 65

4.3.4 Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero 67
4.4. Contrastación estadística de hipótesis 68
4.4.1 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett 69
4.4.2 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó 70
4.4.3 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas 71
4.4.4 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero .. 73
4.5. Discusión de resultados 74
CAPÍTULO 5: IMPACTOS 78
CONCLUSIONES 81
RECOMENDACIONES 84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86
ANEXOS 95
Anexo N°1: Tablas resumen de conteos vehiculares 96
Anexo N°2: Cálculo de los niveles de servicio de las intersecciones 113
Anexo N°3: Script de Python para procesar reporte de Vissim (*.fzp) 116
Anexo N°4: Script de Python para realizar el cálculo de métricas a partir de archivo en formato MS Excel 118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Ranking de ciudades con mayor congestión. Fuente: TomTom (2024). 2
Tabla 2 - Pérdidas atribuibles asociadas al tráfico. Fuente: IPE (2024). 2
Tabla 3 - Tiempos promedio de viaje en Lima. Longitud de tramo: 10km. Fuente: Propia. 2
Tabla 4 - Costos anuales para conductores particulares. Fuente: AAP (2024).. 2
Tabla 5 - Parámetros de los niveles de servicio. Fuente: HCM, 2022. 25
Tabla 6 - Operacionalización de variable independiente. Fuente: Propia. 35
Tabla 7 - Operacionalización de variable dependiente. Fuente: Propia. 35
Tabla 8 - Matriz de consistencia. Fuente: Propia. 37
Tabla 9 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. 64
Tabla 10 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. 65
Tabla 11 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas. 66
Tabla 12 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero. 67
Tabla 13 - Comparación de resultados entre el presente estudio y Quispe y Flores (2023). 75
Tabla 14 - Resumen de conteo vehicular. Cruce: Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. Fuente: Propia. 96
Tabla 15 - Resumen de conteo vehicular. Cruce: Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. Fuente: Propia. 101
Tabla 16 - Resumen de conteo vehicular. Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas. 105
Tabla 17 - Resumen de conteo vehicular. Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero. 109
Tabla 18 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. 113
Tabla 19 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. 114

Tabla 20 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas. 114
Tabla 21 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Riva Agüero. 115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Proceso cuantitativo. Fuente: Hernández, Fernández y Baptista. Metodología de la Investigación (2023)..... 38
Figura 2 - Formato de clasificación vehicular MTC. Fuente: Provías Nacional. 43
Figura 3 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. 47
Figura 4 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. 47
Figura 5 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas. 48
Figura 6 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Riva Agüero..... 48
Figura 7 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. 49
Figura 8 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. 49
Figura 9 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas..... 50
Figura 10 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Riva Agüero. 50
Figura 11 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. 51
Figura 12 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. 51
Figura 13 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas..... 52
Figura 14 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Riva Agüero. 52
Figura 15 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. 53
Figura 16 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. 53
Figura 17 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas..... 54

Figura 18 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Riva Agüero. 54
Figura 19 - Asignación de grupo de señales semafóricas de cabezales de señal por carril (semáforos). 55
Figura 20 - Configuración de parámetros de simulación. 55
Figura 21 - Configuración de atributos de resultados. 56
Figura 22 - Configuración de reportes de simulación. 57
Figura 23 - Obtención de reporte de Vissim (*.fzp). 57
Figura 24 - Script de conversión en Python para lectura de archivo de reporte (*.fzp). 58
Figura 25 - Reporte de resultados en formato MS Excel. 59
Figura 26 - Script en Python para el cálculo de métricas. 59
Figura 27 - Resultado del cálculo de métricas. 60
Figura 28 - Duplicidad de archivos del modelamiento para preparar escenarios adaptativos. 60
Figura 29 - Utilización de detectores en modelamiento de cada cruce. 61
Figura 30 - Configuración del tipo de controlador semafórico. 62
Figura 31 - Configuración de tiempos de fases. 62
Figura 32 - Asignación de nuevas fases semafóricas en modelamiento. 62
Figura 33 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del primer cruce. 69
Figura 34 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del primer cruce. 69
Figura 35 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del primer cruce. 70
Figura 36 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del segundo cruce. 70
Figura 37 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del segundo cruce. 71
Figura 38 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del segundo cruce.. 71
Figura 39 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del tercer cruce. 72
Figura 40 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del tercer cruce. 72
Figura 41 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del tercer cruce. 72
Figura 42 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del cuarto cruce. 73

Figura 43 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del cuarto cruce. 74
Figura 44 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del cuarto cruce. 74

RESUMEN

Esta investigación abarca un problema cotidiano que afecta a miles de limeños: el tráfico vehicular. En particular, se analiza la situación en el distrito de San Miguel, específicamente en el tramo de la avenida La Marina que va desde la Av. Elmer Faucett hasta la Av. Riva Agüero. El rápido crecimiento del parque automotor, la infraestructura vial limitada y la falta de coordinación entre los semáforos tradicionales han generado inconvenientes como largas demoras en el tránsito, mayor consumo de combustible y niveles elevados de contaminación ambiental. Todo esto afecta directamente a la salud, el entorno y la productividad de quienes viven y se desplazan por la ciudad.

En línea con lo descrito, el estudio plantea como objetivo principal analizar si sería viable implementar semáforos inteligentes en esta parte de la ciudad, con la finalidad de mejorar el flujo vehicular y reducir los tiempos de traslado. Para ello, se optó por una metodología con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Se recolectó información a través de conteos vehiculares y simulaciones realizadas con software, lo que permitió comparar escenarios previos y posteriores a la hipotética implementación de esta tecnología.

Los resultados obtenidos, respaldados también por estudios similares, evidencian que los semáforos inteligentes pueden ajustarse en tiempo real según las condiciones presentes del tránsito, dando prioridad a las vías más saturadas. Esto se traduce en una circulación más fluida, menores tiempos de espera y una mejora en la velocidad de desplazamiento.

La investigación concluye que, bajo condiciones simuladas mediante modelación microscópica en PTV Vissim, la implementación de semáforos inteligentes evidencia mejoras significativas en los indicadores de tránsito evaluados.

Palabras clave: semáforos inteligentes, tráfico vehicular, optimización del tránsito, simulación.

ABSTRACT

This research addresses a common issue affecting thousands of residents in Lima: vehicular traffic. Specifically, it analyzes the situation in the district of San Miguel, focusing on the section of La Marina Avenue that stretches from Elmer Faucett Avenue to Riva Agüero Avenue. The accelerated growth of the vehicle fleet, limited road infrastructure and a lack of coordination among traditional traffic lights have caused problems such as long traffic delays, increased fuel consumption and elevated levels of environmental pollution. All these factors directly impact the health, environment and productivity of people living in and travelling through the city.

In line with the problem described, the main objective of this study is to assess the feasibility of implementing smart traffic lights in this part of the city to improve traffic flow and reduce travel times. A quantitative approach with an experimental design was chosen. Data was collected through vehicle counts and simulations using specialized software, allowing for a comparison between scenarios before and after the hypothetical implementation of this technology.

The results, supported by similar studies, show that smart traffic lights can adjust in real time according to current traffic conditions, prioritizing the most congested routes. This results in smoother circulation, shorter waiting times and improved travel speed.

The research concludes that, under simulated conditions using microscopic modelling in PTV Vissim, the implementation of smart traffic lights demonstrates significant improvements in the evaluated traffic performance indicators.

Keywords: smart traffic lights, vehicular traffic, traffic optimization, simulation.

Implementación de semáforos inteligentes para reducir el tráfico vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación Problemática

En distintas ciudades del mundo, la expansión urbana y el incremento del parque automotor han generado mayores niveles de congestión y demoras. Zhang (2025) señala que los sistemas de semaforización tradicionales, basados en tiempos de ciclos fijos, producen incrementos sustanciales en los tiempos de espera y el congestionamiento vehicular. De manera complementaria, Sedeyeh (2023) evidenció que, incorporando tecnologías avanzadas como sensores, comunicación vehicular y algoritmos de inteligencia artificial, incrementan la respuesta del sistema semafórico, reduciendo las colas vehiculares entre un 15% y un 40% según la densidad del tránsito. Estos estudios internacionales evidencian que la gestión del tránsito basada en semaforización fija se ha vuelto insostenible para atender dinámicamente las condiciones viales y resaltan la necesidad de utilizar sistemas tecnológicos inteligentes que optimicen el flujo vehicular en redes viales complejas.

A nivel peruano, Martínez Espinal (2017) analizó el flujo vehicular de Lima y Callao, concluyendo que la operación irregular de los vehículos de transporte público y los colectiveros informales incrementan la congestión en vías principales, afectando la velocidad del tránsito en más del 30% durante horas punta. Por otro lado, Reyna Gonzáles (2022) identificó que el aumento del parque automotor en ciudades de la sierra del país como Huánuco, junto con la deficiente planificación vial, genera diversos cuellos de botella que alteran la movilidad y aumentan los tiempos de desplazamiento de la red urbana. Ambos trabajos coinciden en que la falta de coordinación entre semáforos y el desuso de tecnologías adaptativas agravan la congestión vehicular en distintas ciudades peruanas.

Distintas fuentes oficiales evidencian que la congestión en la ciudad de Lima constituye un problema crítico para la movilidad urbana. Las principales métricas,

que evidencian que genera impactos significativos en movilidad y economía, son mostradas en las siguientes tablas.

Tabla 1 - Ranking de ciudades con mayor congestión. Fuente: TomTom (2024).

País	Puesto Mundial	Incremento en tiempo de viaje
Perú	5°	29% adicional

Tabla 2 - Pérdidas atribuibles asociadas al tráfico. Fuente: IPE (2024).

Concepto	Valor Anual (S/.)
Pérdidas de productividad	S/. 2'000'000,000

Tabla 3 - Tiempos promedio de viaje en Lima. Longitud de tramo: 10km. Fuente: Propia.

Condición	Tiempo (min)
Promedio general	24 min
Hora punta	30 a 35 min

Tabla 4 - Costos anuales para conductores particulares. Fuente: AAP (2024).

Costo Anual (S/.)	Pérdida atribuible a congestión (S/.)
S/. 2,368	S/. 652

En la ciudad de Lima, uno de los tramos que presenta esta problemática de congestión es la Av. La Marina, específicamente entre la Av. Elmer Faucett y la Av. José de la Riva Agüero. Pese a que este tramo cuenta con aproximadamente 2 km de longitud, el tiempo de recorrido en horas punta oscila entre los 20 a 25 minutos, mientras que en horarios fuera de punta el mismo recorrido se realiza en aproximadamente 10 minutos, lo cual representa una variación entre el 100% y el 150%. Dicha variación refleja un problema de coordinación semafórica, sumado a maniobras y hábitos inadecuados de los conductores, alta demanda vehicular y una infraestructura que no está diseñada para adaptarse dinámicamente a los flujos del tránsito en tiempo real.

García De La Cruz y Chancay García (2024) analizaron los desafíos presentes en la implementación de semáforos inteligentes, destacando limitaciones técnicas (interoperabilidad, conectividad y sensores), sociales (aceptación pública y educación vial) y de gestión (mantenimiento, costos). El estudio resalta que, pese a que dichas barreras existen, los beneficios en reducción de congestión y optimización del tránsito superan ampliamente a los sistemas semafóricos tradicionales.

Debido a la evidencia expuesta, se justifica evaluar la viabilidad operacional de implementar un sistema de semaforización inteligente en la Av. La Marina, comprendida como la capacidad del sistema para mejorar el desempeño de la operación vial, bajo las condiciones actuales y proyectadas del tráfico. Mediante simulaciones y proyección de escenarios futuros, este trabajo busca determinar en qué medida la tecnología inteligente podría impactar en la reducción de los tiempos de viaje, mejorar el nivel de servicio de las intersecciones y, a su vez, optimizar el flujo vehicular. Los resultados contribuirán como sustento técnico para la toma de decisiones respecto a la movilidad urbana y, del mismo modo, para el diseño de políticas de tránsito sostenibles para la ciudad de Lima.

1.2. Definición del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cuál es el impacto operacional de la implementación de semáforos inteligentes en la reducción del tráfico vehicular, entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuál es la clasificación y flujo vehicular en la zona de interés?
- ¿Cuáles son los niveles de servicio actuales de las intersecciones descritas de la Av. La Marina?
- ¿Cómo evaluar el impacto operacional frente a este cambio tecnológico, con la instalación de estos nuevos sistemas?

1.3. Justificación

1.3.1 Justificación Teórica

La semaforización inteligente proporcionó diversos beneficios en términos de seguridad y eficiencia del transporte urbano. Todo ello se debió a la capacidad de adaptar los ciclos de temporización entre las luces verde, amarilla y roja según las condiciones en tiempo real, con el fin de optimizar el flujo vehicular y, a su vez, disminuir la congestión en calles adyacentes (Lozado & Méndez, 2019). Por otro lado, fue posible mejorar la seguridad vial debido a que estos equipos incorporaron tecnologías de detección, no solo de vehículos, sino de peatones y ciclistas, obteniendo la ventaja de la reducción de accidentes en estos cruces.

1.3.2 Justificación Práctica

En términos prácticos, la presente investigación evalúa la viabilidad operacional de implementar una red de semaforización inteligente en la Av. La Marina, considerando su capacidad de mejorar la eficiencia del flujo vehicular y optimizar las condiciones de operación en el corredor analizado.
Los beneficios prácticos de implementar una red de semaforización inteligente se basan en los siguientes aspectos:

- Reducir los tiempos de espera en intersecciones, a través de la priorización dinámica de vías con mayor flujo vehicular. Distintos estudios han demostrado que los sistemas de control inteligente de semáforos, a través de algoritmos de aprendizaje automático y sensores adaptativos, pueden disminuir los tiempos de espera promedio en un rango del 24% al 34%, en comparación con los sistemas tradicionales de ciclos fijos (Zhang, 2023).
- Facilitar el paso preferente a vehículos de emergencia como ambulancias y unidades de bomberos. Se ha comprobado que el hecho de integrar sistemas capaces de detectar la aproximación de vehículos de emergencia y ajustar temporalmente la secuencia para permitirles el paso rápido puede reducir los tiempos de desplazamiento en las rutas de mayor criticidad hasta en un 62,85% bajo condiciones de alta congestión (Zhong y Chen, 2022).

- Disminuir el consumo de combustible y las emisiones gaseosas al medio ambiente, optimizando la calidad del aire en zonas urbanas de mayor congestión. En una simulación desarrollada en una ciudad de Portugal, la implementación de semáforos inteligentes permitió reducir las emisiones de CO_2 entre un 32% y 40%, así como los tiempos de espera entre un 53% y 95% (Santos, Ribeiro, Metrôlho y Dionísio, 2024).

Del mismo modo, la implementación de la semaforización inteligente se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible N°12: Producción y consumo responsables, en la medida que promueve la optimización de la utilización de recursos en el transporte urbano. Al ajustar dinámicamente los tiempos semafóricos en función de la demanda vehicular real, disminuye el número de detenciones, los tiempos de ralentí y los periodos de congestión innecesarios, lo que conlleva a un menor consumo de combustible y un uso más eficiente de la estructura vial existente. Desde un punto de vista práctico, esta optimización contribuye a disminuir el desperdicio de recursos energéticos, mejorar la eficiencia de la operación del sistema de transporte y reducir los impactos negativos asociados a una ineficiente gestión del tránsito, sin requerir ampliaciones físicas de la red vial. En ese sentido, la propuesta estudiada no solo mejora el desempeño del tránsito, sino que también aporta a una gestión más responsable y sostenible de los recursos urbanos, en concordancia con los principios del ODS N°12 (Transportation Research Board, 2022; PTV Group, 2025).

1.3.3 Justificación Metodológica

El uso de simulaciones computacionales especializadas permite modelar y proyectar el comportamiento del tráfico con y sin la implementación de semáforos inteligentes. Dicho enfoque permite analizar escenarios alternativos, calibrar parámetros operativos y estimar el impacto en indicadores clave como velocidad promedio, tiempos de espera y niveles de servicio. Los resultados obtenidos servirán de insumo para la toma de decisiones técnicas y la evaluación de la viabilidad del proyecto. La simulación resulta metodológicamente superior, debido a que permite evaluar escenarios futuros, replicar condiciones de alta

demanda sin interrumpir la vía, disminuir costos de experimentación y, a su vez, analizar variaciones de ciclos semafóricos que no pueden probarse físicamente sin necesidad de afectar la operación real.

La metodología empleada requirió la modelación de cuatro intersecciones semafóricas críticas del tramo evaluado, con el fin de comparar el escenario actual con un escenario mejorado mediante semáforos inteligentes. La selección se realizó considerando niveles de congestión, flujos horarios y representatividad dentro del corredor analizado.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar el impacto operacional de la implementación de semáforos inteligentes en la reducción el tráfico vehicular, entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar el flujo vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima, clasificando los tipos de vehículos que transitan en diferentes horarios del día.
- Determinar los actuales niveles de servicio de las intersecciones descritas de la Av. La Marina.
- Evaluar el impacto operacional de la implementación de semáforos inteligentes en las intersecciones descritas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco filosófico de la investigación

2.1.1 Ontología: Naturaleza del fenómeno estudiado

La ontología de esta investigación se sustenta en un enfoque realista-positivista, el cual asume que los fenómenos del tránsito vehicular pueden ser medidos objetivamente mediante indicadores cuantificables como tiempos de viaje, niveles de servicio, flujo vehicular y longitud de cola.

En línea con esta perspectiva, el comportamiento del sistema vial puede modelarse y analizarse mediante herramientas de simulación microscópica, permitiendo evaluar de manera objetiva cuáles son los efectos de la implementación de semáforos inteligentes en condiciones controladas.

2.1.2 Axiología: Valores que orientan la investigación

Desde el punto de vista axiológico, la investigación está orientada hacia la mejora de la movilidad urbana y la optimización del uso de recursos públicos, promoviendo bienestar social, eficiencia y sostenibilidad mediante el uso de tecnologías de gestión del tránsito.

2.2. Antecedentes del problema

En las siguientes líneas, se mencionarán distintos trabajos de investigación e implementaciones que abordaron la situación problemática planteada en el presente documento, tanto a nivel local como internacional.

2.2.1 Antecedentes Nacionales

- Quispe y Flores (2023). *Análisis de la implementación de semáforos inteligentes para mejorar el nivel de servicio en la Av. Garcilaso de la ciudad de Cusco*. Se planteó como objetivo general determinar el efecto de la implementación de semáforos inteligentes en tres intersecciones de la avenida mencionada en la ciudad del Cusco. La investigación se realizó mediante trabajo de campo durante tres semanas, en el cual se identificaron horas pico y se midieron tiempos de viaje, longitudes de cola

y volúmenes vehiculares. Posteriormente, se elaboró un modelo de simulación en PTV Vissim, calibrado mediante la utilización de la prueba T-Student y el indicador GEH, asegurando la representatividad del comportamiento real del tráfico. Los resultados indicaron que, bajo un escenario en donde se implementen semáforos inteligentes y una proyección del flujo a 5 años, las intersecciones mejoraron su nivel de servicio hacia niveles C y D, además de evidenciarse una reducción de los tiempos de viaje entre 12% y 18% y de las longitudes de cola, entre un 15% y 22%. Los autores concluyen que la semaforización inteligente contribuye significativamente a optimizar el tránsito vehicular en el tramo considerado para la evaluación. Este antecedente es relevante para el actual estudio, debido a que utiliza una metodología similar basada en simulación en Vissim, aborda un contexto peruano que es comparable y demuestra de forma empírica que la implementación de semáforos inteligentes puede mejorar el flujo vehicular. Además, la reciente publicación del trabajo aporta soporte técnico al análisis de viabilidad del presente trabajo.

- Rivera y Velásquez (2020). *Propuesta de implementación de un sistema de semaforización inteligente para mejorar los niveles de servicio de la Av. Javier Prado Oeste, tramo Ca. Las Palmeras y Ca. Las Flores en el distrito de San Isidro*. En el presente trabajo, se planteó como objetivo general proponer la implementación de un sistema de semaforización inteligente en las intersecciones descritas del distrito de San Isidro. La investigación se desarrolló mediante un modelo de simulación microscópico utilizando el software PTV Vissim, complementado con el programa Synchro 10.0 para la optimización de los ciclos semafóricos. La metodología del trabajo comprendió cuatro etapas principales: la recolección de datos en campo, la construcción de los modelos, su calibración y validación con parámetros estadísticos GEH y, finalmente, la simulación de la proyección de futuros escenarios. Los resultados estadísticos mostraron que, bajo el escenario propuesto, las intersecciones evaluadas mejoraron sus niveles de servicio, pasando de

categorías E y F (congestión severa) a C y D (niveles aceptables de tránsito vehicular), indicadores establecidos por el High Capacity Manual (HCM). El estudio reporta una disminución en las longitudes de cola estimadas entre 15% y 25% y en los tiempos de viaje entre 10% y 17% aproximadamente, lo cual evidencia la eficiencia de la sincronización adaptativa de los semáforos. En conclusión, los autores mostraron que la aplicación de sistemas de semaforización inteligente basada en sincronización adaptativa optimiza de manera eficiente la movilidad vehicular en vías urbanas de gran demanda, lo cual representa una alternativa viable frente al creciente aumento del tránsito. Este antecedente es pertinente para el presente estudio, ya que utiliza una metodología similar basada en simulación en el software PTV Vissim, aborda una avenida de la ciudad de Lima comparable y ofrece evidencia empírica respecto a la mejora del tráfico mediante control adaptativo. Su vigencia y el aporte técnico de los resultados respaldan la conveniencia de evaluar la viabilidad de implementación de semáforos inteligentes en la Av. La Marina.

- Salas y Villa (2022). *Propuesta de implementación de semáforos inteligentes para una mejora en la transitabilidad de la Av. José Gálvez en la ciudad de Chimbote*. El estudio tuvo como fin general proponer la implementación de un sistema semafórico inteligente que mejore la transitabilidad de la avenida mencionada, afectada por el incremento del parque automotor y la consecuente congestión vehicular. En principio, se efectuó un análisis de la situación actual identificando el nivel de servicio del cruce de la Av. José Gálvez con la Av. Ladislao Espinar y posteriormente, se desarrolló un estudio de viabilidad técnico-económica para la implementación del sistema. Los resultados estadísticos evidenciaron que la mayor demanda vehicular ocurría entre las 12:00 pm y 1:00 pm, registrándose un flujo total de 4195 vehículos, valor que corresponde a un nivel de servicio F, acorde con el manual de carreteras. Del mismo modo, el análisis económico estimó una inversión de S/. 1.467.497 para la instalación del sistema semafórico inteligente, sin

considerar aquellos costos adicionales correspondientes a la operación, mantenimiento y capacitación del personal. Los autores concluyen que la implementación de un sistema semafórico inteligente es viable para la avenida descrita de la ciudad de Chimbote, dado que la intersección diagnosticada presenta condiciones muy desfavorables, por lo cual se requiere una intervención tecnológica. Este antecedente es relevante para la presente investigación, ya que aborda un problema similar de congestión urbana, evalúa la viabilidad técnica y económica de la semaforización inteligente y emplea indicadores de nivel de servicio aplicables al contexto peruano. Su aporte permite comprender la magnitud de la congestión asociada a los niveles de servicio críticos y refuerza la pertinencia de analizar la viabilidad de la implementación de semáforos inteligentes en la Av. La Marina.

- Carpio, Oviedo, Reynozo y Tejada (2017). *Semaforización inteligente como alternativa de solución al problema del tránsito en la ciudad de Arequipa*. Este trabajo tuvo como objetivo determinar la viabilidad y los beneficios de la utilización de un sistema semafórico inteligente en la zona del centro histórico de la ciudad de Arequipa, con el fin de mitigar el problema del tránsito vehicular creciente en el área. El estudio adoptó un enfoque cualitativo y cuantitativo. Además, se seleccionó un área del centro de la ciudad en donde predomina la circulación de taxis, registrándose flujos significativos de 46% a 62% en distintas horas del día. Se recolectaron datos en dos intersecciones para modelar varios escenarios de simulación, evaluando variables como velocidad media y ajustes en tiempos de fase. Los resultados mostraron incrementos en la velocidad promedio del tránsito: 10% en la mañana, 4,7% al mediodía, 4,6% en la tarde/noche y 4,6% los días domingo. Del mismo modo, se estimaron más de 36,000 horas ahorradas en tiempos de desplazamiento, lo que representa un ahorro económico aproximado de S/. 119,340 en combustible. Finalmente, el estudio concluye que la implementación de un sistema semafórico inteligente en el centro histórico de Arequipa es viable tanto en términos de movilidad urbana como de ahorro de tiempo y

combustible. Además, a través de la metodología SNIP y una evaluación financiera con un horizonte de tiempo de 10 años, se determinó que los beneficios superan la inversión. Este antecedente es pertinente para la presente investigación, ya que demuestra, mediante simulación y evaluación económica, que la semaforización inteligente es una alternativa viable para mejorar la movilidad y reducir tiempos de viaje en contextos urbanos con alta demanda vehicular. Sus resultados cuantitativos sobre velocidad, ahorro de tiempo y evaluación financiera, respaldan el análisis de viabilidad que se busca realizar para la Av. La Marina.

- Apéstegui (2024). *Sistema inteligente de gestión de semáforos en tiempo real*. En el presente estudio, se planteó como objetivo desarrollar un sistema inteligente de gestión de semáforos capaz de ajustar en tiempo real la duración de ciclos semafóricos, con la finalidad de disminuir la congestión vehicular ocasionada por semáforos de tiempos fijos que no responden a las condiciones reales del tráfico. La investigación se llevó a cabo mediante el diseño de un modelo heurístico basado en tecnologías que utilizan inteligencia artificial. Para ello, se utilizaron bibliotecas como OpenCV y YOLO, que permiten detectar y realizar seguimiento de vehículos a partir de imágenes en tiempo real. Pese a que no se especificó un área de aplicación concreta, el estudio se orienta a entornos urbanos con altos niveles de tránsito. Como parte del análisis comparativo, se efectuaron simulaciones sobre 15000 tramos viales con el fin de evaluar el rendimiento del sistema adaptativo frente a semáforos de tiempos fijos. Los resultados obtenidos evidenciaron una mejora del 18% en la eficiencia del ciclo semafórico, incrementando de 39 a 47 ciclos por hora en el sistema adaptativo. Este aumento evidenció una reducción de los tiempos de espera y una mayor fluidez vehicular en situaciones de tráfico intenso. El estudio concluye que un sistema de semaforización inteligente basado en visión artificial constituye una alternativa efectiva para optimizar el flujo vehicular en zonas urbanas densamente transitadas. Asimismo, valida que los sistemas adaptativos superan ampliamente a los

semáforos de tiempos fijos al responder dinámicamente a la velocidad, densidad y comportamiento del tráfico. Este antecedente es pertinente para los fines del presente trabajo de investigación, ya que incorpora tecnologías de visión artificial (YOLO y OpenCV) y modelos heurísticos actuales, aportando una base técnica moderna que respalda el uso de sistemas adaptativos en vías urbanas. La validación de la reducción de tiempos de espera y mejora del flujo vehicular contribuye directamente al sustento del problema central planteado para el análisis del tránsito de la Av. La Marina.

- Santisteban y Rojales (2020). *Semáforo inteligente y congestión vehicular en la intersección de la Av. Luis Gonzáles y la calle San José de la ciudad de Chiclayo*. En el presente trabajo, se abordó lo relacionado con el proceso de implementación de un sistema de optimización del tránsito vehicular que se adapte a las condiciones reales del tráfico en la zona analizada. La investigación fue llevada a cabo realizando registros fotográficos como fuente primaria, para analizar el comportamiento del tráfico en la zona de estudio. A partir de dichos registros, se aplicó un algoritmo de procesamiento de imágenes y técnicas de aprendizaje automático, el cual está orientado al conteo vehicular y peatonal bajo diferentes condiciones: vehículos detenidos o en movimiento y personas cruzando o esperando. El sistema presentó un margen de error de ±2 unidades en todas las categorías evaluadas. Del mismo modo, se integraron las imágenes de dos cámaras en una sola vista para optimizar el análisis y detección, logrando tiempos de procesamiento promedio de 700 ms, adecuados para la operación del sistema semafórico adaptativo. El estudio concluye que la integración de técnicas de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático permite desarrollar un sistema semafórico capaz de adaptarse a las condiciones reales del tráfico. La precisión alcanzada y el tiempo de procesamiento obtenido demuestran que el sistema es viable y puede implementarse en zonas urbanas con problemática de alta congestión. Pese a que el estudio fue realizado en la ciudad de Chiclayo, la problemática abordada de intersecciones urbanas

congestionadas es plenamente comparable a la dinámica vehicular que presenta la Av. La Marina en la ciudad de Lima, lo cual aumenta la validez del antecedente para el presente trabajo de investigación.

- Ticona (2021). *Análisis y diseño de un sistema de semaforización para el control del tráfico vehicular utilizando PLC para la intersección de los jirones San Román con Dos de Mayo en la ciudad de Juliaca*. En este trabajo de investigación, se planteó como objetivo analizar y diseñar un sistema de semaforización inteligente, basado en un controlador lógico programable (PLC), para optimizar el control del tráfico vehicular en la intersección de los jirones San Román y Dos de Mayo en la ciudad de Juliaca, donde no existía un sistema adecuado de gestión de tránsito. La investigación fue desarrollada a través de un análisis de la problemática del congestionamiento vehicular en la zona de estudio, seguido del diseño de un sistema semafórico automatizado. Para la detección vehicular, se instalaron sensores inductivos en el pavimento con el fin de registrar la presencia de vehículos en ambas vías. Los datos captados por dichos sensores fueron procesados por un PLC, encargado de determinar los tiempos óptimos para el cambio de luces. Adicionalmente, se incorporó una interfaz de comunicación Bluetooth que permitió monitorear y ajustar los tiempos semafóricos en tiempo real, en especial durante las horas de mayor congestión. El diseño del sistema se sustentó en algoritmos de diagramas de flujo que optimizan el tránsito vehicular. El sistema propuesto mejoró la circulación vehicular en la intersección analizada, reduciendo los tiempos de llegada a los destinos. El diseño basado en PLC y sensores inductivos demostró ser efectivo para gestionar el tránsito de manera dinámica, aportando un sistema de semaforización óptimo que contribuye a reducir la congestión vehicular de la ciudad. El estudio concluye que la implementación de un sistema de semáforos controlado a través de un PLC y sensores inductivos es una solución viable y eficiente para mejorar la fluidez vehicular en zonas que carecen de sistemas semafóricos adecuados. La capacidad de detección y ajuste dinámico del sistema permite optimizar los tiempos de cambio y mejorar la movilidad

en puntos críticos. Este análisis es muy pertinente para el presente trabajo de investigación; en principio presenta un enfoque basado en sensores inductivos y control mediante un PLC, lo cual constituye una alternativa tecnológica distinta a los sistemas tradicionales. Del mismo modo, pese a que el estudio se desarrolla en la ciudad de Juliaca, la problemática de intersecciones congestionadas que carecen de sistemas adaptativos es muy comparable a la situación de diversos puntos críticos de la Av. La Marina, en especial durante las horas punta.

- Palomino e Ingunza (2017). *Propuesta de mejora sostenible del nivel de servicio de una intersección y evaluación de su área de influencia. Caso de estudio: Intersección Av. Canadá y Av. Parinacochas de la ciudad de Lima*. El objetivo de este estudio fue plantear una mejora del nivel de servicio en la intersección descrita y, a su vez, evaluar el impacto de dicha mejora en su área de influencia. Para el trabajo se empleó un enfoque cuantitativo, ya que se recolectaron datos de aforo vehicular y características geométricas y patrones de circulación en la sección de interés y las vías aledañas. Con esta información, se modeló la situación actual utilizando el software Synchro V8, lo que permitió identificar las principales deficiencias operativas, en especial durante las horas de mayor demanda. Posteriormente, los autores plantearon una propuesta de mejora que combinó la modificación de tiempos semafóricos y ajustes en la infraestructura vial, evaluando su desempeño mediante proyecciones de tráfico a un horizonte de tiempo de 5 años. Los resultados mostraron mejoras significativas en el nivel de servicio en comparación con el escenario inicial; los tiempos de viaje se redujeron en aproximadamente 30% y las colas disminuyeron entre 25% y 40%. Se concluyó que la mejora propuesta resulta sostenible en cuanto a los niveles de servicio, lo cual plantea que la utilización de semáforos inteligentes sea viable. Este antecedente resulta pertinente para el presente trabajo de investigación ya que evidencia, mediante modelación y análisis prospectivo, cómo la optimización de ciclos semafóricos y la modernización de la infraestructura pueden contribuir a mejorar de

manera sostenible los niveles de servicio en las intersecciones de vías de alto tránsito, esto a su vez representa un aporte comparativo y metodológico que respaldan la misma evaluación de la viabilidad de implementación de esta tecnología en la Av. La Marina.

2.2.2 Antecedentes Internacionales

- Carrión (2023). *Análisis costo-beneficio de la implementación de semáforos inteligentes en el sector urbano del cantón Loja*. Este estudio planteó como objetivo analizar la viabilidad económico-social de la implementación de semáforos inteligentes en el sector urbano descrito. El trabajo empleó un enfoque cuantitativo que contempló la estimación integral de los costos asociados a la propuesta, incluyendo adquisición tecnológica, instalación, operación y mantenimiento, junto con la evaluación monetaria de los beneficios esperados. Entre estos beneficios fueron considerados el ahorro económico para los usuarios, la reducción de los tiempos de viaje, la disminución en los niveles de congestión y mejoras en la seguridad vial. Para el estudio, el autor identificó los costos directos e indirectos del proyecto, estimando una inversión inicial aproximada de USD 1,2 millones, mientras que los beneficios anuales, asociados a todos los ahorros que esta implementación conlleva, alcanzaron valores cercanos a los USD 1,8 millones por año. De manera adicional, se determinó que los tiempos de viaje en las intersecciones evaluadas podrían reducirse en un 12% y 18%, dependiendo del periodo horario. Por otro lado, se estimó que el riesgo de accidentes disminuiría en un 15% tras la modernización del sistema semafórico. Los resultados del análisis mostraron que la propuesta es económicamente viable, dado que la relación beneficio/costo fue superior a 1.4, lo cual indica que los beneficios proyectados superan los costos iniciales del proyecto. Asimismo, se evidenció que la implementación de esta tecnología tendría impactos sostenibles en el tiempo, optimizando la movilidad vehicular y peatonal, incrementando la seguridad vial y contribuyendo a la modernización del transporte urbano en la ciudad de Loja. El estudio concluye que los semáforos inteligentes representan una estrategia

efectiva para mejorar la circulación y calidad de vida de los habitantes, recomendando lineamientos para futuros proyectos basados en movilidad urbana. Este antecedente internacional es relevante para la presente investigación, ya que demuestra, mediante un análisis económico, que la implementación de semáforos inteligentes puede resultar sostenible en contextos urbanos latinoamericanos. La incorporación de indicadores cuantitativos aporta evidencia comparable y fortalece la validez del enfoque que se busca aplicar en el estudio de viabilidad de la implementación de la misma tecnología en la Av. La Marina, bajo una perspectiva técnica, económica y social.

- Soto (2022). *Semaforización inteligente en la ciudad de Lemgo, Alemania*. El objetivo de este trabajo fue describir el desarrollo e implementación del proyecto “KI4LSA” en la ciudad de Lemngo, Alemania, ejecutado por parte del “Institute of Optronics, System, Technologies and Image Exploitation (IOSB)” , cuyo propósito fue la optimización del flujo vehicular mediante la aplicación de un sistema de semaforización inteligente basado en inteligencia artificial y sistemas ciberfísicos, integrando sensores, cámaras y algoritmos para ajustar en tiempo real la duración de los ciclos semafóricos según la demanda vehicular. El proyecto reportó datos cuantitativos relevantes: una reducción promedio del tiempo de viaje del 10%, mejoras en el flujo vehicular entre 10% y 15% en simulaciones, disminución de emisiones y ruido entre el 15% y 20%, reducción de la cantidad de paradas por vehículo hasta en un 20% y en algunos casos, disminuciones hasta en un 30% en los tiempos de espera entre cambios de luz; además, estudios complementarios del ecosistema KI4PED estimaron una reducción hasta de un 25% en riesgos de accidentes peatonales en contextos urbanos comparables. Estas cifras sustentan la efectividad de los sistemas inteligentes para adaptarse dinámicamente a las condiciones del tráfico, demostrando mejoras significativas en la movilidad en entornos reales. Este antecedente es muy relevante para el presente trabajo, ya que ofrece evidencia internacional reciente y cuantificada de los beneficios de la implementación de la semaforización

inteligente, brindando un aporte técnico importante para evaluar la viabilidad de implementación de tecnologías similares en la Av. La Marina, debido a que sus principios de funcionamiento y resultados son comparables con el contexto urbano de la ciudad de Lima.

- Campos (2022). *Evaluación para la implementación de semáforos inteligentes en los cruceros de Boulevard Luis Donaldo Colossio*. Este estudio planteó como objetivo evaluar la factibilidad de implementar un sistema de semáforos inteligentes en los principales cruceros del Boulevard Luis Donaldo Colossio, en la ciudad de Nogales, Sonora (México), con el fin de mejorar la movilidad y reducir la congestión vehicular derivados del crecimiento desordenado y la obsolescencia del sistema semafórico vigente. En el estudio, se utilizó un enfoque cuantitativo, recopilando datos de flujo vehicular y peatonal en distintos puntos. Del mismo modo, se realizaron encuestas a ciudadanos para conocer su percepción sobre los semáforos actuales y los tiempos de espera. Los resultados estadísticos mostraron que en horas pico algunos cruces registraban flujos que superaban los 1800 vehículos/hora, superando la capacidad de operación recomendada para vías primarias; además, se detectaron tiempos de espera promedio entre 95 y 120 segundos, con algunos casos que superaban los 150 segundos en los horarios de mayor demanda. Las encuestas revelaron que el 78% de los ciudadanos catalogaba como ineficiente la coordinación semafórica, mientras que el 84% manifestó presentar excesivas demoras incluso en horarios fuera de punta. A través de una evaluación técnica, se determinó que la implementación de semáforos inteligentes permitiría reducir el embotellamiento, especialmente del transporte privado, gracias a la capacidad de adaptación dinámica de los ciclos semafóricos, de acuerdo a las condiciones reales del tráfico. Este antecedente es relevante para el presente estudio, ya que aborda la evaluación de viabilidad de un sistema de semaforización inteligente a través de un análisis cuantitativo similar al que se plantea para la Av. La Marina. Del mismo modo, proporciona datos concretos en relación con mejoras operativas y percepción ciudadana, lo

cual fortalece el sustento necesario para justificar la pertinencia de aplicar una tecnología similar en un contexto urbano con una problemática similar a la del distrito de San Miguel de la ciudad de Lima.

- Ortega (2020). *Semaforización inteligente en la ciudad de Bogotá, Colombia*. En este estudio se presentó el análisis del proceso de implementación del sistema de semáforos inteligentes en la ciudad de Bogotá, con el fin de optimizar el tránsito urbano y mejorar la seguridad y eficiencia de la vía para todos sus usuarios, que incluyen conductores, ciclistas y peatones. Se describe el proyecto de modernización de la red semafórica iniciado en abril del 2019, que contempló el reemplazo progresivo de los más de 1400 controladores tradicionales por equipos inteligentes capaces de operar hasta 32 grupos semafóricos por cada intersección, incrementando de forma significativa la flexibilidad de operación de la red. La implementación fue coordinada por el Centro de Gestión del Tránsito (CGT), que integró una nueva central de operaciones con capacidad de monitoreo en tiempo real, capaz de procesar información proveniente de sensores, cámaras y reportes de ciudadanos. De acuerdo con los resultados reportados por la entidad gestora, la modernización de la red permitió duplicar la capacidad operativa de las intersecciones y reducir los tiempos de espera en diversos puntos críticos, logrando disminuciones estimadas en el rango de 12% a 22% en congestión promedio durante horas punta. Del mismo modo, la actualización de la tecnología permitió contar con semáforos capaces de adaptarse dinámicamente a las condiciones reales del tráfico, reduciendo la saturación vehicular y mejorando a su vez, el flujo. En enero del 2020 se concluyó la puesta en marcha del sistema, consolidando uno de los procesos de modernización semafórica más importantes de Latinoamérica. Este antecedente es relevante para el presente estudio, ya que aporta evidencia de otro país sobre los efectos reales de implementar semáforos inteligentes en grandes redes urbanas, mostrando mejoras medibles en sincronización, congestión y capacidad de operación de las intersecciones. El caso planteado para la ciudad de

Bogotá constituye una referencia sólida que brinda el respaldo técnico de la evaluación de la pertinencia de evaluar la implementación de tecnologías similares en la Av. La Marina, reforzando el sustento metodológico y comparativo del trabajo actual.

- Ordóñez (2024). *Sistema de semáforo inteligente con aprendizaje automático para una intersección de alto flujo vehicular. Caso de estudio: Cuenca, Ecuador*. En este trabajo de investigación, se planteó como objetivo desarrollar un sistema semafórico inteligente basado en técnicas de aprendizaje automático, capaz de adaptarse a las condiciones del tránsito y mejorar la circulación vehicular en intersecciones de alto flujo en la ciudad de Cuenca, Ecuador. La investigación se llevó a cabo utilizando sensores de presencia vehicular y peatonal para la recopilación de datos en tiempo real. Estos datos fueron procesados mediante controladores y algoritmos de aprendizaje automático, con el fin de determinar los tiempos óptimos del cambio de luces. Asimismo, se empleó software de simulación para validar el funcionamiento del sistema propuesto. El estudio se llevó a cabo en la intersección de las calles Bolívar y Tarqui en la ciudad de Cuenca, Ecuador, la cual es caracterizada por un amplio volumen vehicular y peatonal. Los resultados evidenciaron una mejora significativa en la gestión del tráfico respecto al sistema convencional. El sistema inteligente incrementó la eficiencia en la circulación vehicular, logrando una reducción de la congestión de la intersección analizada. En total, se pudo obtener una reducción en los tiempos de espera entre un rango del 8,7% al 14,1%. La adaptación dinámica del semáforo permitió optimizar los tiempos de cambio y mejorar el flujo en condiciones de alta demanda. El estudio concluye que la implementación de semáforos inteligentes con aprendizaje automático permite optimizar la movilidad urbana y mejorar la seguridad vial en intersecciones de alto flujo. Se evidencia que los sistemas adaptativos ofrecen un rendimiento superior a los sistemas tradicionales de tiempos fijos. Este antecedente es especialmente relevante y útil para el presente trabajo de investigación. En principio, el uso de aprendizaje automático posiciona este estudio en la línea de

tecnologías avanzadas que respaldan la evolución de los sistemas adaptativos; los resultados positivos descritos, ofrecen una evidencia sólida que fortalece el sustento del impacto esperado en el análisis de la implementación descrito en el presente trabajo de investigación; finalmente, ya que el antecedente aborda el estudio de una intersección urbana de alto tránsito, el antecedente presenta un caso comparable que permite extrapolar resultados y respaldar la pertinencia del proyecto del estudio que se realizará para la Av. La Marina en la ciudad de Lima.

- Carrasco (2024). *Predicción de tráfico vehicular empleando series de tiempo y redes neuronales, aplicándolos a la optimización semafórica en un micro simulador*. El presente trabajo de investigación aborda la problemática del tráfico vehicular en la Av. Pie de la Cuesta, en Santiago de Querétaro, México. En línea con ello, se planteó como objetivo el diseño de un sistema semafórico inteligente para optimizar los ciclos del corredor vial de la avenida descrita líneas arriba. Para el estudio, se realizaron predicciones del tráfico utilizando modelos autorregresivos, filtros de Kalman y redes neuronales recurrentes (RNN), implementados en un simulador microscópico. Se recopiló data histórica de siete intersecciones de la avenida estudiada, evaluando las predicciones para distintos horizontes de tiempo (un día, una hora, una semana y un mes). Como parte de los resultados obtenidos, los filtros de Kalman y las RNN consiguieron un coeficiente de determinación de 0,95 para predicciones de un día y una semana. Por otro lado, los modelos autorregresivos mostraron limitantes en estimaciones de corto plazo, con un coeficiente de determinación muy por debajo de 0.1. Al aplicar predicciones en el simulador, permitió identificar ciclos semafóricos óptimos, reduciendo los tiempos de viaje hasta en un 36% en el corredor estudiado. La investigación concluye que es posible tener una mejor gestión semafórica para la movilidad urbana, mediante la aplicación de técnicas de predicción avanzadas, con modelos de series de tiempo y neuronales, combinados con simulación de tráfico para ajustar los ciclos semafóricos. En particular, las técnicas basadas en filtros de Kalman y RNN se muestran como las

más idóneas para predicción a mediano plazo, lo cual permite planificar un control semafórico adaptativo que contribuya a reducir los tiempos de viaje. Este antecedente es relevante para el presente trabajo de investigación, debido a que ilustra distintos elementos importantes. En principio, brinda un aporte metodológico sólido, ya que combina predicción de tráfico, simulación y optimización semafórica, lo cual podría contribuir a modelar escenarios futuros en la Av. La Marina de la ciudad de Lima para el año 2027, por ejemplo. Por otra parte, el estudio ilustró cifras cuantitativas de mejora, con reducciones de aproximadamente 36%; brinda un escenario comparativo relevante en los corredores viales densamente transitados. Finalmente, el estudio ofrece la posibilidad de evaluar distintos horizontes de predicción (hora, día, semana y mes), lo cual ofrece una base para adaptar la metodología a distintos escenarios de planificación urbana o variabilidad diaria en la ciudad de Lima.

- González (2019). *Sistema de semaforización inteligente. Caso de estudio: Azogues, Ecuador*. Para el caso de este trabajo de investigación, se planteó como objetivo la elaboración de un plan de implementación y planificación vial para un sistema de semaforización inteligente con el fin de mejorar la gestión del tránsito en el centro de la ciudad de Azogues, Ecuador. El trabajo partió de un diagnóstico descriptivo del comportamiento vehicular en la zona, identificando que el punto más crítico de congestión registraba volúmenes que superaban los 1200 vehículos/hora en horas punta, lo cual generaba demoras en la intersección central del distrito urbano. A partir de dicho análisis, el autor elaboró una propuesta técnica basada en una red de telecomunicaciones, complementada con hardware y software accesibles para la administración municipal. El diseño incluyó la elaboración de flujogramas de funcionamiento, definición de métricas de tráfico (conteo vehicular, tiempo de espera y densidad por carril) y la integración de componentes electrónicos con capacidad de comunicación entre controladores. El trabajo concluyó que el sistema propuesto era factible técnica y económicamente, evidenciando que la implementación de tecnologías de

semaforización inteligente basadas en soluciones de bajo costo contribuiría de manera significativa a optimizar la movilidad urbana en el área analizada. Este antecedente es relevante para el presente estudio, ya que demuestra la viabilidad de implementar sistemas de semáforos inteligentes incluso en ciudades con recursos limitados, lo cual aporta una referencia técnica comparativa para el análisis que se realizará para la Av. La Marina, fortaleciendo el sustento metodológico de que corresponde a una solución adaptable al contexto peruano.

2.3. Bases Teóricas

En los siguientes párrafos, se mostrará a detalle cuáles son aquellas teorías o enfoques teóricos que se encuentran relacionados con el tema de investigación presentado.

2.3.1 Calibración

Proceso sistemático mediante el cual se ajustan y validan los parámetros de un sistema o instrumento, como el caso de un software, para garantizar que sus resultados sean precisos y coherentes respecto de un patrón o referencia establecida. Es un proceso técnico y documental que asegura la exactitud, consistencia y trazabilidad del software en su función específica, estableciendo la relación cuantitativa entre valores esperados bajo condiciones controladas (Gometrics, 2021). La calibración puede implicar configuraciones, ajustes y procedimientos que afectan la medición o el procesamiento de datos, de modo que estos se alineen con estándares definidos.

2.3.2 Capacidad de la vía

Se entiende como la máxima cantidad de vehículos que pueden circular a través del tramo específico de una vía o intersección durante un periodo de tiempo específico, siempre que se mantengan las condiciones operativas adecuadas. Esta capacidad de ocupación, la cual también es medible en porcentaje, está influenciada directamente por características geométricas de la vía, como el número de carriles, radios de giro, entre otros. directamente de factores geométricos de la vía, tales como el número de carriles, radios de giro, etc.). Su

determinación es importante, ya que permite reconocer los puntos críticos de congestión y de ese modo implementar estrategias de gestión del tráfico que permitan mejorar la calidad de servicio en la red vial (Laquita & Quiroz, 2024).

2.3.3 Ciclo semafórico

Está referido al total del tiempo en el que un semáforo muestra las tres luces (roja, amarilla y verde), antes de repetirla. Este ciclo se mide en segundos y es un tiempo establecido para optimizar el flujo vehicular (Aruquipa, 2019). Asimismo, debe existir sincronía entre la duración de los ciclos entre semáforos contiguos, en la misma calle o avenida.

2.3.4 Control adaptativo

Consiste en un sistema de gestión inteligente capaz de ajustar en tiempo real la duración de las fases y ciclos semafóricos, de acuerdo a la demanda vehicular existente. A diferencia de los semáforos tradicionales, utiliza sensores, cámaras o detectores magnéticos con el fin de obtener información instantánea del tráfico y de ese modo, reconfigurar la programación. Su aplicación mejora los niveles de servicio, reduce la congestión vehicular y los tiempos de viajes, constituyéndose como una potencial herramienta dentro de las ciudades inteligentes (Fierro, 2024).

2.3.5 Densidad de tráfico

Es una métrica que indica la cantidad de vehículos que ocupan un espacio de la calle, avenida o carretera, en un momento dado (López, Pérez & Camacho, 2019). Generalmente, está expresado por el número de vehículos por unidad de longitud.

2.3.6 Flujo de tráfico

Referido a la cantidad de vehículos que transitan por un lugar en específico en un intervalo de tiempo (Pérez, Bautista, Salazar & Macías, 2014).

2.3.7 Longitud de cola

Es la distancia ocupada por vehículos detenidos o en espera en un acceso o carril de una intersección vial; se expresa normalmente en metros y puede reportarse como longitud de cola instantánea, longitud de cola promedio o longitud de cola máxima (Ordoñez, 2024). En estudios de micro simulación y análisis operacional, esta medida se calcula a partir de teoría de colas y de los resultados de un simulador como Vissim, por mencionar un ejemplo. Asimismo, se utiliza para cuantificar la congestión y comparar escenarios actuales con uno propuesto.

2.3.8 Metodología del HCM 2022

El manual presenta conceptos, procesos e indicaciones para calcular la capacidad vial y los niveles de servicio, con el objetivo de estimar de forma estandarizada estos valores (HCM, 2022). El análisis parte de una velocidad base en condiciones casi ideales, la cual se ajusta mediante factores correctivos asociados al entorno. Posteriormente, se determina la capacidad vial considerando variables como porcentaje de vehículos pesados, pendientes y geometría de los carriles. Con esos datos, se evalúa el volumen horario de demanda y la capacidad disponible, obteniendo así el grado de saturación. Luego se estima la velocidad media de la corriente vehicular ajustada, que funciona como indicador de la calidad del servicio. En función de esta velocidad y de otros parámetros de flujo, como la densidad, se asigna el nivel de servicio, clasificado desde A (óptimo) hasta F (congestión severa). Finalmente, para tramos segmentados, los resultados se ponderan de acuerdo con la longitud de cada segmento, obteniendo un nivel de servicio promedio representativo de toda la vía analizada.

2.3.9 Niveles de servicio

Medida cualitativa, definida por el aumento de los tiempos de demora en las colas de acceso a las intersecciones. Según el Highway Capacity Manual (HCM, 2022), representan la calidad de servicio a través de seis niveles clasificados en función del rango de demoras en el tránsito.

Tabla 5 - Parámetros de los niveles de servicio. Fuente: HCM, 2022.

Nivel de Servicio	Demora (s/veh)
A	≤10
B	>10-20
C	>20-35
D	>35-55
E	>55-80
F	>80

2.3.10 Predicción y simulación del tráfico

Mediante el uso de software, es posible realizar una imitación del comportamiento del tránsito vehicular para una red vial en un futuro cercano (PTV Group, 2020). Para llevar a cabo dicho proceso, se emplean distintos datos del tráfico, tanto históricos como en tiempo real, además de modelos matemáticos y estadísticos. Herramientas como PTV Vissim permiten crear modelos precisos de la red vial, incluyendo la ubicación de semáforos y otros elementos.

2.3.11 PTV Vissim

Es un software de simulación microscópica desarrollado por PTV AG, diseñado para poder analizar el movimiento de todo tipo de transporte mediante modelos de comportamiento detallados que reproducen con precisión las condiciones y características locales de las intersecciones. Permite modelar la elección de rutas, uso y cambios de carril, así como el seguimiento del comportamiento vehicular. Su funcionamiento está basado en un modelo de seguimiento vehicular ajustable por parámetros definidos por el usuario, lo cual facilita la representación de las condiciones reales y la calibración precisa del modelo (PTV Group, 2025). La simulación es complementada con los modelos de cambio de carril libre y forzado, mejorando su capacidad de análisis en cualquier intersección.

2.3.12 Semáforos Inteligentes

A. Definición

- Son sistemas basados en inteligencia artificial, diseñados exclusivamente para optimizar el tránsito vehicular y peatonal, ajustándose en tiempo real

a las condiciones del entorno. Estos equipos buscan mejorar el desplazamiento y evitar embotellamientos, superando aquellas limitantes presentes con un sistema semafórico tradicional. (Peralta & Mendieta, 2017).

- Son un conjunto de equipos que forman parte de un sistema de transporte inteligente, que tiene como objetivo mejorar la gestión vehicular y peatonal en intersecciones. Estos sistemas se caracterizan por su capacidad de adaptarse a las condiciones del entorno en tiempo real y así, modificar los tiempos de los ciclos semafóricos de acuerdo al flujo de tránsito, lo cual contribuye con la reducción de la congestión y a mejorar la seguridad en los cruces peatonales. Este enfoque está basado en la implementación de esta tecnología que permite la optimización del uso de la infraestructura vial existente, minimizando así la posibilidad de crear una nueva infraestructura (Flores, 2021).

- Son sistemas de control del tráfico que utilizan sensores y tecnologías avanzadas para regular el flujo de tránsito eficientemente. Estos equipos se adaptan a las condiciones del tráfico en tiempo real, reduciendo tiempos de espera y optimizando la movilidad urbana, contribuyendo a la reducción de la congestión vehicular y, a su vez, a la mejora de la seguridad vial (Manzo & Arzate, 2019).

B. Tipos de semáforos inteligentes

- Ospina & Caro, 2021. *Estudio y planteamiento de un modelo de semaforización inteligente como solución a problemas de movilidad en Bogotá*. En este trabajo de investigación, se detallaron distintos tipos de semáforos inteligentes y los pasos a seguir para su proceso de implementación. En principio, se describen a continuación cuáles son los tipos de semáforos inteligentes:
    - ✓ Semáforos adaptativos: ajustan los tiempos de sus ciclos, en función de las condiciones del tráfico en tiempo real. Utilizan sensores para medir el volumen de vehículos y cambiar

automáticamente la duración de sus luces, optimizando el flujo vehicular y tiempos de espera.

- ✓ Semáforos con detección peatonal: incorporan botones o sensores, activando la señal de cruce cuando es necesario. Estos equipos optimizan la seguridad vial, garantizando que los peatones puedan cruzar de manera segura al solicitarlo de acuerdo a la demanda.
- ✓ Semáforos interconectados: Son aquellos equipos capaces de sincronizar sus tiempos entre sí y con un centro de control. Esta conexión contribuye a reducir la congestión al optimizar el flujo vehicular en las intersecciones.
- ✓ Semáforos con cámara: integran cámaras que permiten monitorear el tráfico y detectar infracciones, como el paso en rojo. Estos dispositivos pueden formar parte de un amplio sistema de control de tráfico, mejorando la seguridad vial.
- ✓ Semáforos con tecnología IoT: integran dispositivos conectados a la red, con el fin de recopilar y analizar datos sobre el tráfico. Esto permitirá una gestión más eficiente y fundamentada en datos en tiempo real.

C. Requerimientos de instalación de los semáforos inteligentes

- ✓ Instalación de cámaras y sensores: Con el fin de equipar las intersecciones viales, es importante seleccionar la tecnología adecuada. En principio, la instalación de sensores inductivos en el pavimento detectará el paso de vehículos y las cámaras ofrecerán una visión en tiempo real del tráfico y, a su vez, permitirán la identificación de infracciones. La ubicación estratégica de estos dispositivos garantizará la recopilación de datos precisos, lo cual permitirá realizar un análisis efectivo del comportamiento del tráfico.
- ✓ Desarrollo de software: Contar con un programa especializado es fundamental para el procesamiento de los datos recopilados. Este sistema debe poder interpretar la información en tiempo real y

ajustar los ciclos semafóricos de manera automática, regulando así el flujo vehicular y los tiempos de espera en las intersecciones. Asimismo, el software puede incluir herramientas de aprendizaje automático, de modo tal que se incremente el rendimiento conforme se vayan recopilando más datos.

- ✓ Interconexión: Es importante garantizar la sincronía de los semáforos en las distintas intersecciones. Esto no solo permite mejorar la fluidez del tráfico, sino que también ayuda a reducir la congestión en puntos críticos. La comunicación en tiempo real entre semáforos garantiza una respuesta rápida a cambios en las condiciones del tráfico, como obras en la vía, accidentes u otros eventos.
- ✓ Gestión de mantenimiento: La continuidad en la operación de los semáforos inteligentes depende de una adecuada planificación de los trabajos de monitoreo. Esto incluye la revisión periódica de sensores, cámaras y la actualización periódica del sistema para poder incluir las mejoras pertinentes. Un adecuado plan de mantenimiento garantiza que el sistema siga funcionando de una forma óptima y sea capaz de adaptarse a los cambios del entorno urbano.

En síntesis, los semáforos inteligentes son sofisticados sistemas que gestionan el tráfico de vehículos y peatones mediante tecnología y comunicación interconectada (IoT). Estos dispositivos utilizan distintos algoritmos y sensores que permiten ajustar los tiempos de ciclos semafóricos del equipo de acuerdo a las condiciones del tráfico en tiempo real, lo que contribuye a mejorar la fluidez del tránsito, disminuir las emisiones contaminantes e incrementar la seguridad vial. Además, un gran análisis de volúmenes de datos permite optimizar la gestión de su funcionamiento y coordinar de manera eficiente la red vial desde una oficina de control central.

2.3.13 Tiempos de espera

Son definidos como el tiempo en el que los conductores de vehículos o peatones deben aguardar en una intersección antes de continuar con su trayecto. Dichos tiempos son relevantes para la evaluación de la eficiencia del tránsito (Castañeda, 2021). Para medirlos, se utilizan cámaras de tiempo real o, en su defecto, el cronometraje manual en el lugar, con el fin de cuantificar el tiempo de detención en los semáforos.

2.3.14 Tiempos de luz semafórica

Son aquellos tiempos de duración específicos asignados a un ciclo de cada fase del semáforo: verde, amarillo y rojo. Determinan de manera directa la capacidad de la intersección y la seguridad de los usuarios. Una distribución adecuada de la temporización brinda un balance a la eficiencia vehicular con la protección de peatones y la reducción de conflictos del tránsito. El análisis de estos tiempos es crucial en procesos de optimización y diseño de semaforización (Díaz & Horna, 2023).

2.3.15 Tráfico Vehicular

- Oropeza & Vilca, 2021. *Metodología en una plataforma de sistema de información geográfica para reducir la congestión vehicular de una red vial*. En este trabajo de investigación, el tráfico vehicular es definido como un fenómeno causado por distintos factores que incluyen la cantidad de vehículos en función del tiempo y, a su vez, la presencia de distintos paraderos y reductores de velocidad. En el estudio está propuesta una metodología basada en el uso de un sistema de información geográfica para analizar y reducir la congestión vehicular, enfocándose únicamente en el distrito de Chorrillos. Se utilizó tanto un enfoque cualitativo como cuantitativo, en donde se analiza la congestión vehicular a partir de medidores transversales de vehículos.

- Bejar & Torre, 2023. *Análisis y propuesta de mejora del tráfico vehicular y seguridad vial aplicando reductores de velocidad en los tramos cementerio, mercado Vinocanchón y mercado de mayoristas ferial de*

productores en el distrito de San Jerónimo en el año 2022. En este trabajo de investigación, se describe al tráfico vehicular como el conjunto de vehículos que circulan por una red vial y que, a raíz de distintos factores como el aumento del flujo vehicular y el control de velocidad, generan problemas de inseguridad y congestión. El estudio se ha focalizado en el distrito de San Jerónimo y, a su vez, propone distintas ideas de mejora como los reductores de velocidad con el fin de contribuir al incremento de la seguridad vial.

- Portilla & Benavides, 2021. *Evaluación del tráfico vehicular para dar solución al congestionamiento en la intersección entre la Av. Rodrigo Pachano y Manuelita Sáenz de la ciudad de Ambato*. En esta investigación, el tráfico vehicular es definido como un fenómeno social que puede ser analizado a través de distintas métricas y modelos matemáticos. Se llevó a cabo un análisis detallado que incluyó la identificación de distintos parámetros como las horas pico, volúmenes máximos horarios y el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA). Asimismo, fueron evaluados otros factores como los niveles de servicio, la velocidad del tráfico, la densidad y capacidad en las intersecciones. Finalmente, con el fin de establecer patrones de flujo vehicular, se realizó un conteo vehicular en periodos de 15 minutos. Del mismo modo, se incorporaron elementos como señalización vial y ciclos semafóricos en el análisis, con el fin de establecer distintas recomendaciones que optimicen el tránsito vehicular y los niveles de contaminación sonora en el área estudiada.

En relación con lo detallado anteriormente, el tráfico vehicular es un fenómeno complejo que abarca tanto aspectos físicos como sociales, vinculado con el flujo de personas y vehículos en la vía pública. Es analizado desde la ingeniería del tránsito, con el fin de gestionar eficientemente el flujo vehicular. Distintos factores como la capacidad de las vías y el comportamiento de los conductores influyen directamente en el tráfico, impactando tanto la movilidad como la seguridad vial. Entre las distintas soluciones a esta problemática, incluye la implementación de semáforos inteligentes para reducir los tiempos de traslado y a su vez, mejorar la seguridad y disminuir los impactos ambientales y económicos. Este enfoque

busca reducir la congestión vehicular y las repercusiones negativas a través de un diseño y operación más eficientes, considerando factores como el nivel de servicio y el impacto ambiental.

2.3.16 Velocidad Vehicular

Definida como la rapidez promedio con la que los vehículos se desplazan a lo largo de una vía, generalmente es expresada en kilómetros por hora. Constituye un importante indicador de seguridad, servicio y comodidad de los usuarios. Velocidades bajas evidencian congestión, mientras que las velocidades altas podrían comprometer la seguridad vial. La medición de este parámetro es importante al elaborar procesos de calibración de tráfico y en la evaluación del desempeño de carreteras (Peña, 2022).

2.4. Glosario

- Capacidad vial: Se define como el número máximo de vehículos que pueden atravesar una vía o intersección bajo condiciones normales de operación. Depende de factores como el diseño geométrico, el volumen de tránsito y la regulación semafórica, siendo parámetros fundamentales en la metodología del High Capacity Manual (HCM) para la evaluación del rendimiento vial (Gutiérrez, 2020).

- Intersección vial: Es el espacio físico en el cual coinciden dos o más vías y en el que se regula la interacción entre vehículos y peatones. Las intersecciones representan puntos importantes para la fluidez del tránsito y la seguridad vial, motivo por el cual son fundamentales en el análisis de proyectos de semaforización inteligente (Chávez, 2021).

- Micro simulación de tráfico: Consiste en un método computacional que modela el comportamiento individual tanto de vehículos como de peatones, en una red de transporte simulada. Permite evaluar el impacto de diferentes indicadores de gestión del tráfico, como la implementación de semáforos inteligentes o modificación en los tiempos de ciclo, previo a llevarlas a la práctica (Huamán, 2022).

- Modelo de simulación: Es la representación matemática y computacional del sistema de tráfico que reproduce el comportamiento de los flujos vehiculares en escenarios reales o hipotéticos. Su utilización permite analizar alternativas de gestión y prever el desempeño de la vía frente a cambios en infraestructura o programación semafórica (Fernández, 2020).

- Niveles de servicio (LOS): Corresponde a un indicador de tipo cualitativo y cuantitativo, el cual mide la calidad de operación en una vía o intersección. Comprende una escala de 6 niveles, desde la A (fluidez óptima) hasta la F (congestión severa), considerando parámetros como la seguridad de circulación, comodidad del usuario y tiempos de espera (Mendoza, 2021).

- Tiempo de ciclo: Hace referencia a la duración de un ciclo semafórico en su totalidad, el cual incluye la suma de las fases de luz verde, ámbar y roja. Su correcta determinación es esencial para optimizar la movilidad en intersecciones urbanas y reducir los tiempos de espera en un contexto de alta demanda de vehículos (Ramírez, 2022).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Hipótesis General

La implementación de semáforos inteligentes reduce significativamente el tráfico vehicular, entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima.

3.2. Hipótesis Específicas

- El flujo vehicular en zona de interés presenta variaciones significativas según la hora del día, con un mayor tráfico durante las horas punta y un predominio de la presencia de vehículos ligeros respecto a los pesados.
- Las intersecciones descritas de la Av. La Marina presentan niveles de servicio entre D y F, los cuales evidencian un desempeño vial reducido.
- La implementación de semáforos inteligentes en las intersecciones evaluadas generará una mejora operacional, evidenciada en la reducción de tiempos de viaje, la disminución de colas vehiculares y la mejora del nivel de servicio.

3.3. Identificación de variables

A. Variables independientes

- Semáforo inteligente: Es un equipo de sistema de control del tráfico que utiliza sensores y tecnologías avanzadas para regular el flujo de tránsito eficientemente. Estos equipos se adaptan a las condiciones del tráfico en tiempo real, reduciendo tiempos de espera y optimizando la movilidad urbana, contribuyendo a la reducción de la congestión vehicular y, a su vez, a la mejora de la seguridad vial (Manzo & Arzate, 2019).

B. Variables dependientes

- Tráfico vehicular: Está definido como un fenómeno causado por distintos factores que incluyen la cantidad de vehículos en función del tiempo y, a su vez, la presencia de distintos paraderos y reductores de velocidad (Oropeza & Vilca, 2021).

3.4. Operacionalización de variables

En las Tablas N°6 y N°7, se mostrará la operacionalización de las variables mencionadas en el punto anterior; es decir, semáforo inteligente y tráfico vehicular.

Tabla 6 - Operacionalización de variable independiente. Fuente: Propia.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Definición Conceptual	Definición operacional y categorización	Ítems para su medición
Semáforo inteligente	Detección de densidad de tráfico	Cantidad de vehículos en un intervalo de tiempo	Un semáforo inteligente es un sistema de control de tráfico que utiliza sensores para ajustar el flujo vehicular en tiempo real, mejorando la movilidad urbana (Manzo & Arzate, 2019).	Los semáforos inteligentes son utilizados con el fin de reducir los tiempos de espera en las intersecciones y, al mismo tiempo, optimizar la seguridad vial.	N° de vehículos que circula por la intersección en 30 minutos
	Tiempos de luz	Duración de las luces verde, ámbar y roja			Tiempo promedio de duración de las luces verde, ámbar y roja
	Adaptación a situaciones de emergencia	Tiempo de respuesta ante vehículo de emergencia			Tiempo de cambio a luz verde ante presencia de vehículo de emergencia

Tabla 7 - Operacionalización de variable dependiente. Fuente: Propia.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Definición Conceptual	Definición operacional y categorización	Ítems para su medición
Tráfico vehicular	Cantidad de vehículos	Cantidad de vehículos en cola en la intersección	El tráfico vehicular está definido como un fenómeno influenciado por el paso de vehículos en una red vial y, a su vez, por la presencia de paraderos y reductores de velocidad (Oropeza & Vilca, 2021).	El tráfico vehicular está referido al flujo de vehículos en una vía, influenciado por el desplazamiento continuo de los mismos, las percepciones de los usuarios y el tiempo que los vehículos permanecen detenidos en las intersecciones.	Cantidad de vehículos promedio en 15 minutos
	Capacidad de la vía	Cantidad de carriles disponibles			Cantidad de carriles operativos
	Velocidad vehicular	Velocidad promedio de circulación			Velocidad promedio en horas punta

3.5. Matriz de Consistencia

En la Tabla N°8, se presenta la matriz de consistencia, en donde se relacionan los diversos componentes detallados en los puntos anteriores.

Tabla 8 - Matriz de consistencia. Fuente: Propia.

Problema Principal	**Objetivo principal**	**Hipótesis principal**	**Variables**	**Metodología**
¿Cuál es el impacto operacional de la implementación de semáforos inteligentes en la reducción del tráfico vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima?	Determinar el impacto operacional de la implementación de semáforos inteligentes para reducir el tráfico vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima.	La implementación de semáforos inteligentes reduce significativamente el tráfico vehicular en la Av. La Marina, entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima.	Variable N°1: semáforo inteligente indicadores: - detección de densidad de tráfico - tiempo de duración de ciclos - tiempo de respuesta ante detección de vehículo de emergencia Variable N°2: tráfico vehicular indicadores: - cantidad de vehículos - capacidad de la vía - velocidad vehicular	Tipo de investigación cuantitativa. recolección de datos, estudio operacional. Diseño de investigación experimental. comparativo de la implementación mediante simulaciones en software. Población vehículos que transiten por el área de interés, datos de tráfico. Muestra conteos vehiculares en las intersecciones.
Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**		
¿Cuál es la clasificación y flujo vehicular en la zona de interés?	Determinar el flujo vehicular entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero en la ciudad de Lima, clasificando los tipos de vehículos que transitan en diferentes horarios del día.	El flujo vehicular en zona de interés presenta variaciones significativas según la hora del día, con un mayor tráfico durante las horas punta y un predominio de la presencia de vehículos ligeros, respecto a los pesados.		
¿Cuáles son los niveles de servicio actuales de las intersecciones descritas de la Av. La Marina?	Determinar los actuales niveles de servicio de las intersecciones descritas de la Av. La Marina.	Las intersecciones descritas de la Av. La Marina, presentan niveles de servicio entre D y F, los cuales evidencian un desempeño vial reducido.		
¿Cómo evaluar el impacto operacional frente a este cambio tecnológico, con la instalación de estos nuevos sistemas?	Evaluar el impacto operacional de la implementación de semáforos inteligentes en las intersecciones descritas.	La implementación de semáforos inteligentes en las intersecciones evaluadas generará una mejora operacional, evidenciada en la reducción de tiempos de viaje, la disminución de colas vehiculares y la mejora del nivel de servicio.		

3.6. Tipo y diseño de investigación

Enfoque: Cuantitativo

Según Hernández, Fernández y Baptista (2023), el enfoque cuantitativo está orientado a medir y analizar variables en un contexto determinado, con el fin de comprobar hipótesis y establecer relaciones entre los fenómenos estudiados. Dicho enfoque sigue un proceso secuencial y estructurado, en el cual cada fase debe completarse antes de avanzar a la siguiente, garantizando la posibilidad de corroborar los resultados mediante análisis estadísticos. La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, ya que trabaja con datos medibles obtenidos a partir de las inspecciones y conteos vehiculares en la zona de estudio, los cuales serán procesados en un software de simulación del tráfico. De este modo, se busca la estimación y análisis, de forma numérica, los efectos que tendría la implementación de semáforos inteligentes sobre el flujo vehicular de la Av. La Marina, en el distrito de San Miguel (Lima). En la figura N.°1, se muestran cuáles son las fases del proceso cuantitativo.

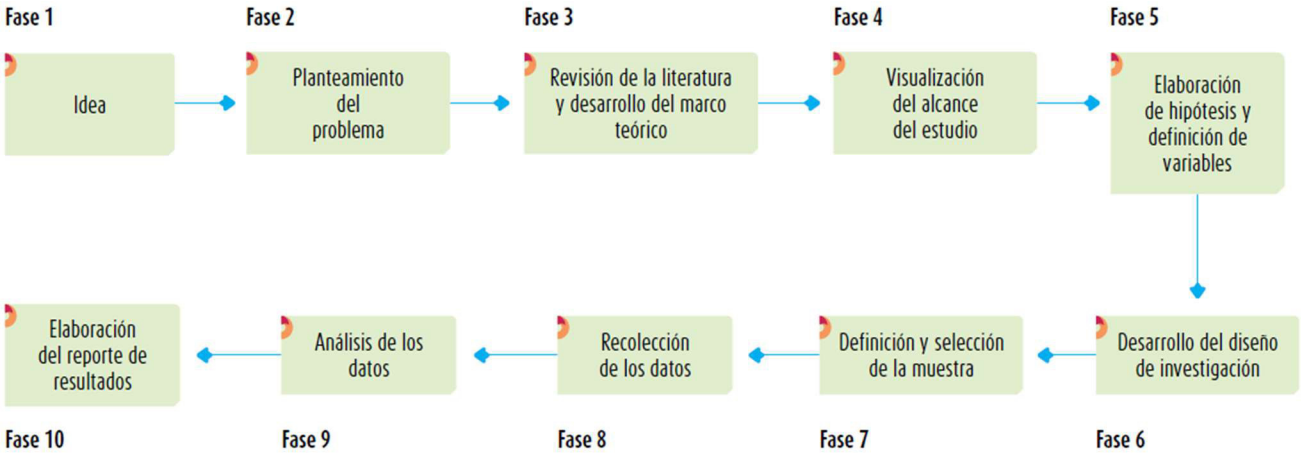


Figura 1 - Proceso cuantitativo. Fuente: Hernández, Fernández y Baptista. Metodología de la Investigación (2023).

Tipo de investigación: Aplicada

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2023), la investigación aplicada utiliza los conocimientos teóricos obtenidos de estudios previos con el fin de resolver problemas en contextos reales. Su propósito es generar soluciones transferibles que contribuyan a la innovación de procesos existentes.

En ese sentido, la presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca aplicar conceptos teóricos sobre tecnologías de control de tráfico y semaforización inteligente para evaluar su impacto real en la movilidad urbana, proponiendo un modelo de simulación que sirva como referencia base para futuras implementaciones en otras vías de Lima Metropolitana.

Nivel de investigación: Explicativo-Causal

Según Hernández, Fernández y Baptista (2023), los estudios explicativos causales se orientan a identificar las causas y efectos de los fenómenos observados, estableciendo relaciones de causalidad entre variables. Este tipo de estudio permite comprender cuáles son las condiciones bajo las cuales ocurre un fenómeno y cómo una variable repercute en otra. Por lo tanto, el nivel de investigación es explicativo-causal, dado que busca determinar cómo la instalación de semáforos inteligentes (variable independiente) afecta el tráfico vehicular (variable dependiente). Mediante simulación computacional, se pretende explicar la relación causa-efecto entre la tecnología utilizada y la mejora en la movilidad vial.

Diseño de investigación: Experimental

Hernández, Fernández y Baptista (2023) sostienen que el diseño experimental de la investigación permite manipular una o más variables independientes para observar su efecto sobre las variables dependientes, dentro de un contexto controlado. En los diseños experimentales, dicha manipulación se realiza en escenarios donde el control de las condiciones no es absoluto, pero suficiente para analizar las relaciones causales de interés. En esta investigación, se adopta el diseño experimental, ya que se manipula a la variable independiente (semáforos inteligentes) a través de una simulación por computadora, observando los cambios en el comportamiento del flujo vehicular (variable dependiente). Aunque no se interviene directamente en la vía real, dicho modelo permite evaluar los efectos del sistema propuesto en condiciones simuladas y controladas.

3.7. Unidad de análisis

La unidad de análisis está referida a todos los elementos sobre los cuales se recolectarán datos en un estudio. Esta unidad, puede ser representada por individuos, objetos, eventos o grupos y su selección depende de los objetivos de la investigación (Hernández, Fernández & Baptista, 2023). Para el caso del presente trabajo de investigación, la unidad de análisis fue un vehículo que transite por las intersecciones semafóricas de interés, las cuales están ubicadas en el distrito de San Miguel de la ciudad de Lima y son las siguientes:

- Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.
- Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.
- Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas.
- Cruce de Av. La Marina con Av. José de la Riva Agüero.

Por otro lado, la variable independiente fue el semáforo inteligente, cuyo impacto se midió mediante simulaciones que generaron parámetros como los ahorros económicos, la precisión en la respuesta del sistema y la velocidad promedio de los vehículos. La variable dependiente fue el tráfico vehicular, evaluado a través de los tiempos de espera, la velocidad promedio de los vehículos y una encuesta de percepción de los usuarios respecto de la nueva implementación. Esta combinación de métricas permitió evaluar de manera integral el impacto de los semáforos inteligentes en la zona de estudio.

3.8. Población de estudio

La población está definida como el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones. Esto implica delimitar la población que va a ser estudiada, sobre la cual se pretende generalizar los resultados obtenidos en la investigación (Hernández, Fernández & Baptista, 2023).

En este estudio, se consideró como población al conjunto de vehículos que circulan por la zona de interés descrita en el apartado anterior. Esta población fue considerada infinita, dado que no es posible determinar con precisión el número exacto de vehículos que transitan por dicha área.

3.9. Tamaño de la muestra

Para obtener una muestra representativa que permita analizar la problemática actual del tránsito en la zona, se realizaron observaciones en los horarios de mayor afluencia: entre las 5:00 p. m. y 7:00 p.m. Asimismo, el análisis se llevó a cabo durante los meses de enero a marzo del 2025, con una frecuencia de observación Inter diaria y un tiempo de trabajo en campo de dos horas por sesión.

Adicionalmente, la cantidad de vehículos que transitan por la vía se determinó mediante métodos de observación directa en campo, de acuerdo con los parámetros definidos en el apartado anterior.

3.10. Selección de la muestra

Para esta muestra, correspondiente a la observación del tránsito vehicular en la zona de interés, se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia. Este enfoque, permitió analizar el tránsito durante las horas punta, según las fechas y frecuencias establecidas previamente. El muestreo no probabilístico está definido como la selección de un subgrupo de la población, en función de las características de la investigación o de los objetivos específicos del investigador, sin depender de la probabilidad. Pese a que no garantiza una representatividad estadística, resulta favorable en investigaciones del tipo cualitativas o cuando un muestreo probabilístico no es viable (Hernández, Fernández & Baptista, 2023).

3.11. Técnicas de recolección de datos

En principio, una de las técnicas para la recolección de datos de tráfico fue el análisis documental, definido como el estudio sistemático de los documentos, materiales, artefactos y registros con el propósito de extraer información relevante. Para garantizar la validez de los datos obtenidos, el investigador debe verificar la autenticidad y el estado de los materiales (Hernández, Fernández & Baptista, 2023). En el contexto del presente estudio, el análisis documental se centró en la recopilación y revisión de los datos existentes sobre el tráfico en las zonas de interés, las cuales sirvieron como base para el análisis posterior.

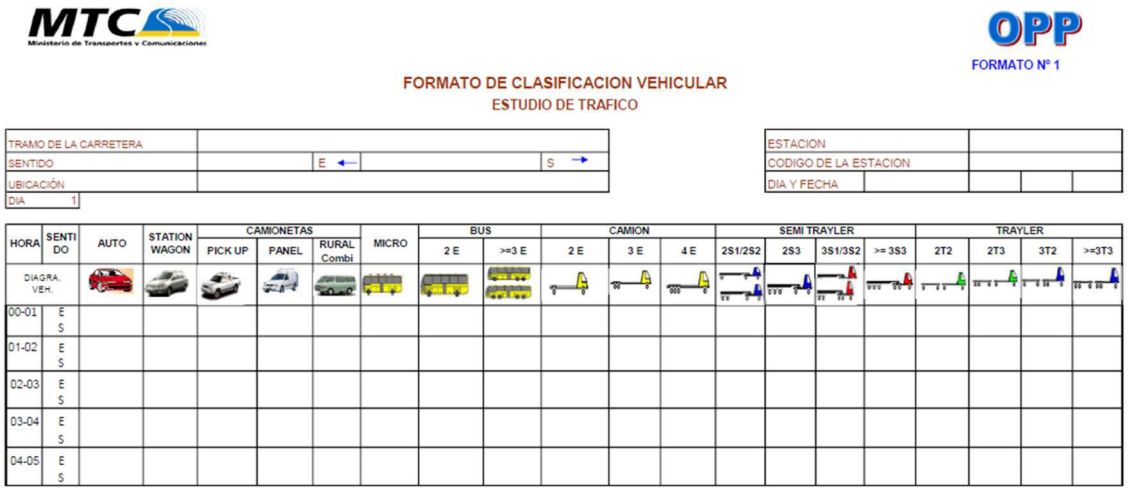
Por otro lado, se empleó la técnica de observación directa de los hechos, que consiste en observar de manera no participante los eventos tal como ocurren, lo que permite al investigador captar información directa tanto del entorno como de los participantes (Hernández, Fernández & Baptista, 2023). Las notas de observación deben estructurarse en dos formatos:

- Condensadas, que registren de forma inmediata los sucesos observados.
- Ampliadas, que incluyen detalles específicos de los hechos.

En el presente estudio se empleó como instrumento una ficha de recolección de datos para la clasificación vehicular, elaborada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). Este formato es utilizado comúnmente en estudios de tránsito vehicular realizados en intersecciones de alto flujo, y constituye una herramienta estandarizada para el levantamiento de información en campo.

La ficha se tomó como referencia metodológica para registrar la cantidad y tipo de vehículos que transitan por las intersecciones seleccionadas, dentro del periodo de observación detallado en este capítulo. La estructura del formato permitió sistematizar los datos de forma ordenada y confiable, lo que facilitó el análisis posterior.

A continuación, se presenta la imagen del formato utilizado como referencia para el desarrollo del estudio. Asimismo, en el Anexo N°1 se muestran las tablas resumen de conteo vehicular realizados en distintas fechas.



MTC Ministerio de Transportes y Comunicaciones

OPP

FORMATO N° 1

FORMATO DE CLASIFICACION VEHICULAR

ESTUDIO DE TRAFICO

TRAMO DE LA CARRETERA		ESTACION	
SENTIDO	E ← S →	CODIGO DE LA ESTACION	
UBICACIÓN		DIA Y FECHA	
DIA 1			

HORA	SENTIDO	AUTO	STATION WAGON	CAMIONETAS			MICRO	BUS		CAMION			SEMI TRAYLER				TRAYLER			
				PICK UP	PANEL	RURAL Combi		2 E	>=3 E	2 E	3 E	4 E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>= 3S3	2T2	2T3	3T2	>=3T3
DIAGRA. VEH.																				
00-01	E																			
	S																			
01-02	E																			
	S																			
02-03	E																			
	S																			
03-04	E																			
	S																			
04-05	E																			
	S																			

Figura 2 - Formato de clasificación vehicular MTC. Fuente: Provías Nacional.

Esta técnica fue esencial para la recolección de datos tanto cualitativos como cuantitativos, ajustándose a los objetivos específicos de este trabajo de investigación.

3.12. Niveles de servicio

El cálculo de los niveles de servicio de cada intersección será mostrado en el Anexo N°2, en donde se presentan a detalle las tablas de resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología del HCM (High Capacity Manual). En dicho anexo, se incluyen los flujos vehiculares por sentido de orientación, la capacidad de cada carril, factores de saturación y demoras promedio por vehículo, además de la asignación de los correspondientes niveles de servicio, tanto por aproximación como para la intersección en su totalidad, para cada caso. Con el fin de dar claridad metodológica, se incorporan previamente los fundamentos de cálculo utilizados en el Highway Capacity Manual (HCM), que constituye una base teórica referencial para el análisis de capacidad y desempeño de las intersecciones evaluadas.

El procedimiento se sustenta en tres componentes fundamentales: la capacidad total (C), el coeficiente de saturación (v/C) y la demora promedio por vehículo (d_1). Estos tres elementos, permiten determinar el nivel de servicio (LOS) en función de los criterios establecidos por el HCM.

- **Capacidad Total (C)**

$$C = s * \frac{g}{Ciclo}$$

C = Capacidad total (veh/hora)

s = Flujo de saturación (veh/hora/carril). Valor de referencia: 1900 veh/hora/carril.

g = Tiempo efectivo de luz verde (segundos).

Ciclo = Tiempo total de ciclo semafórico (rojo + ámbar + verde).

- **Coeficiente de saturación (X)**

$$X = \frac{v}{C}$$

X = Coeficiente de saturación

v = Volumen de demanda (veh/hora)

C = Capacidad (veh/hora)

- **Demora promedio (d_1)**

$$d_1 = \frac{0.5 * C * \left(1 - \frac{g}{Ciclo}\right)^2}{1 - X * \frac{g}{Ciclo}}$$

d_1 = Demora promedio por vehículo (seg/veh)

C = Ciclo semafórico

g/Ciclo = Proporción efectiva de luz verde

X = Coeficiente de saturación

- **Nivel de servicio (LOS)**

  El nivel de servicio es asignado en función de la demora promedio (d_1), de acuerdo a los rangos establecidos en el HCM 2022 para intersecciones semaforizadas.

  - A: ≤ 10 seg/veh. Flujo con mínima demora.
  - B: > 10 – 20 seg/veh. Flujo con demora aceptable.
  - C: > 20 – 35 seg/veh. Flujo con restricciones moderadas.
  - D: > 35 – 55 seg/veh. Flujo con demora perceptible.
  - E: > 55 – 80 seg/veh. Condición de saturación.
  - F: > 80 seg/veh. Demora excesiva.

Una vez establecidos los parámetros fundamentales del HCM, se procede a la aplicación de las fórmulas correspondientes para la estimación de los niveles de

servicio. En concordancia con ello, se presentan en el Anexo N°2 los resultados obtenidos para el análisis de las intersecciones evaluadas.

3.13. Análisis e interpretación de la información

Para procesar la información recopilada mediante las técnicas descritas anteriormente, se empleó MS Excel como herramienta principal para el registro, organización y tratamiento inicial de los datos. Del mismo modo, con el fin de simular las condiciones observadas en campo y evaluar el impacto potencial de la implementación de semáforos inteligentes en las zonas de interés, se utilizó el software PTV Vissim, el cual permitió modelar el comportamiento del tráfico, evaluar distintos escenarios y estimar la eficiencia del sistema semafórico propuesto. Además de ello, se recurrió al uso de Python para procesar los reportes generados por Vissim, convertirlos en formatos compatibles y fácilmente interpretables en Excel y realizar los cálculos necesarios a partir de dicha información. Esto permitió obtener parámetros comparables entre ambos escenarios de tráfico y establecer una base sólida para el análisis y la interpretación de los resultados de la presente investigación. Finalmente, se utilizó el software SPSS para realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos y sustentar cuantitativamente su relevancia.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo detalla los resultados obtenidos de la simulación del tráfico vehicular de las cuatro intersecciones de interés de la Av. La Marina, correspondiente al tramo comprendido entre la Av. Elmer Faucett y la Av. Riva Agüero, en el distrito de San Miguel de la ciudad de Lima. Para cada cruce, se aplicaron dos escenarios:

- Semaforización fija, que representa las condiciones actuales observadas en campo.
- Semaforización adaptativa, propuesta como una alternativa de mejora.

Los resultados fueron obtenidos mediante la utilización del software PTV Vissim 2025 (SP09) en su versión estudiantil, complementado con procedimientos de cálculo desarrollados en Python, los cuales permitieron derivar los indicadores de desempeño vehicular utilizados para el análisis comparativo:

- Tiempo de viaje promedio.
- Velocidad promedio.
- Longitud máxima de cola.
- Flujo vehicular promedio.
- Densidad vehicular.
- Ocupación.

Estos parámetros permiten cuantificar el desempeño de cada escenario y analizar la mejora potencial introducida por el sistema adaptativo.

4.1. Configuración general de las simulaciones en PTV Vissim

Con el fin de garantizar uniformidad en la metodología, los cruces fueron modelados siguiendo la misma secuencia de pasos. A continuación, se describe de manera detallada la preparación del escenario base con semáforos de tiempos fijos.

4.1.1 Construcción del modelo vial

I. Dibujo de la red vial

- Se trazaron los segmentos correspondientes de cada avenida, replicando la geometría del cruce acorde con la realidad.
- Fueron ingresados los carriles, radios, conectores y restricciones de giro según inspección de campo.

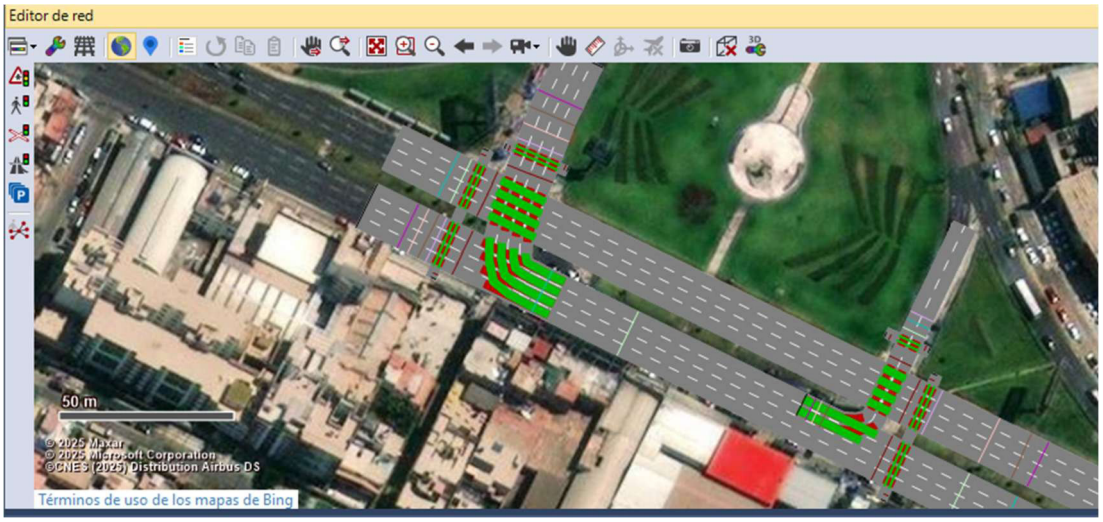


Figura 3 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.

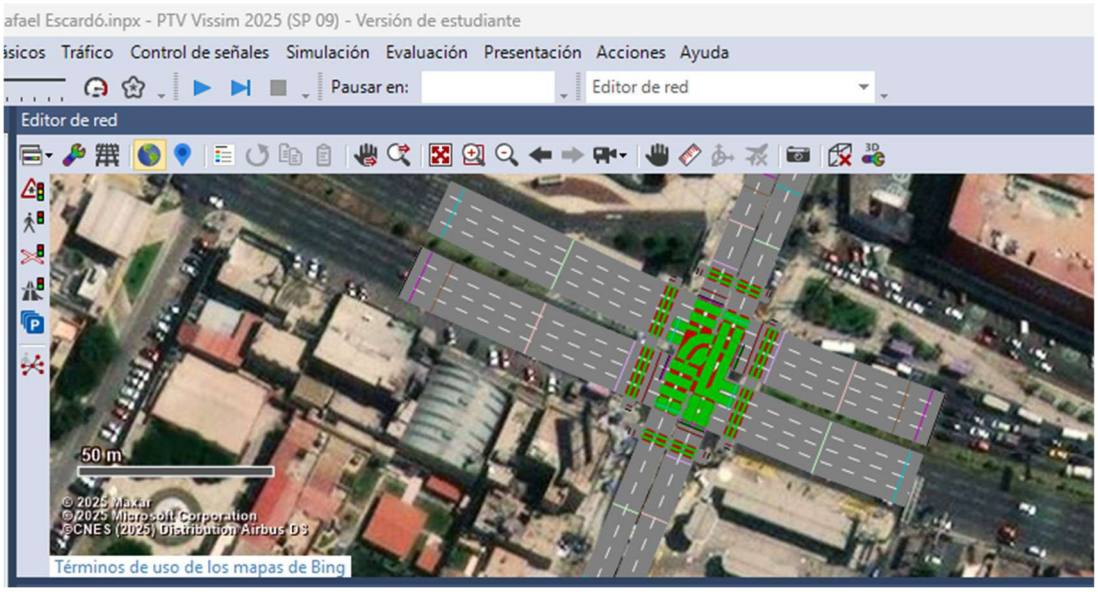


Figura 4 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.

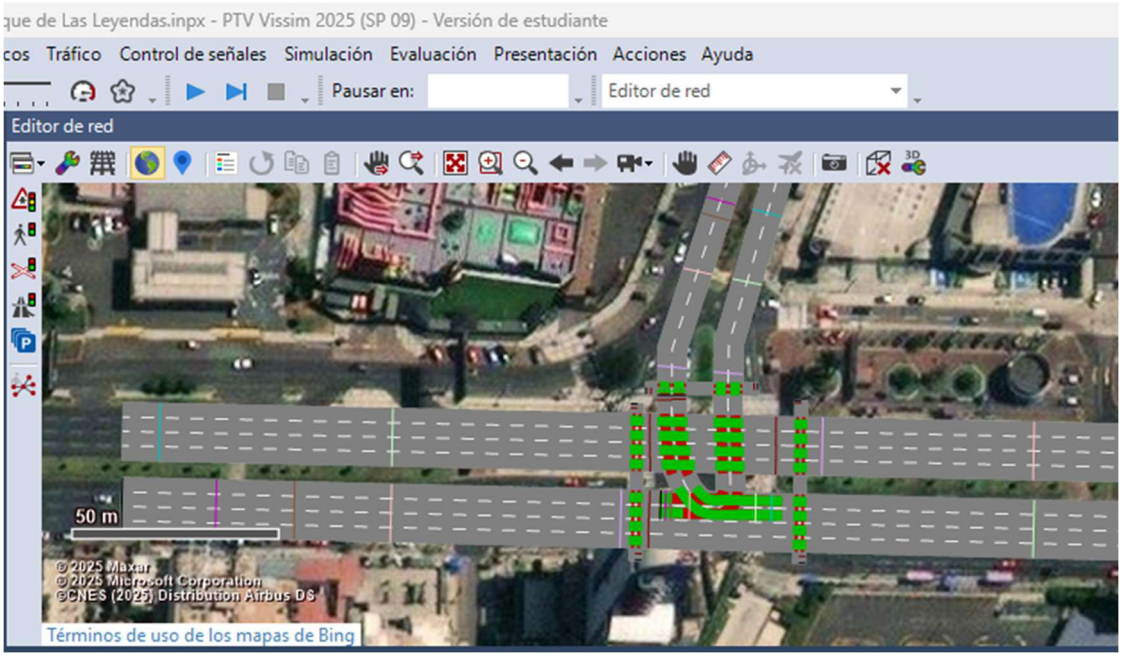


Figura 5 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas.

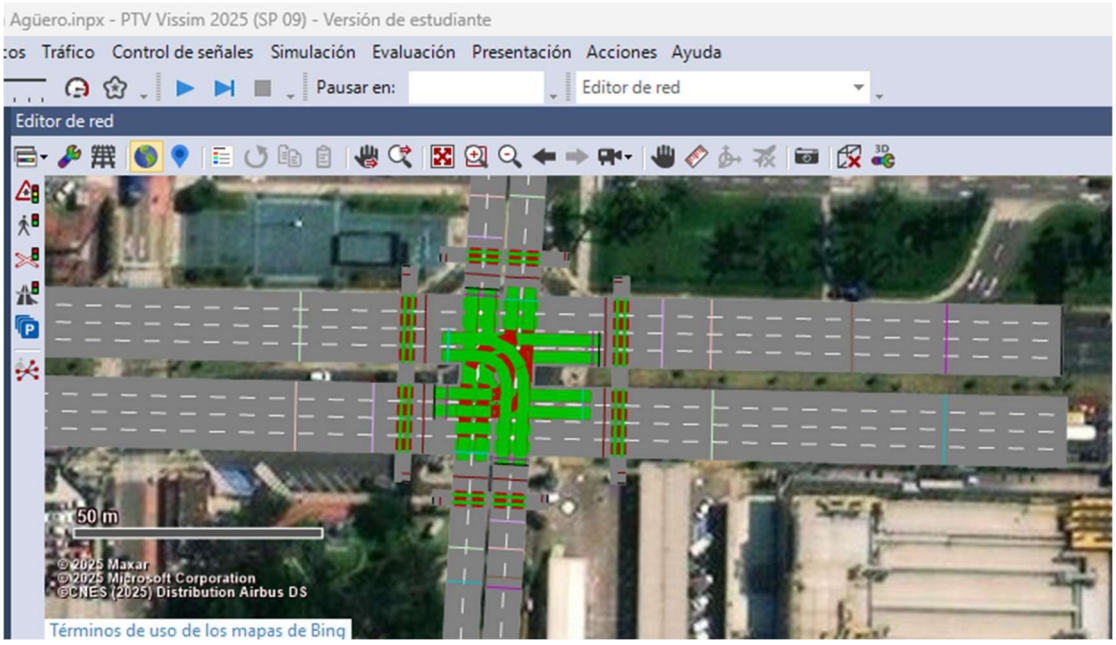
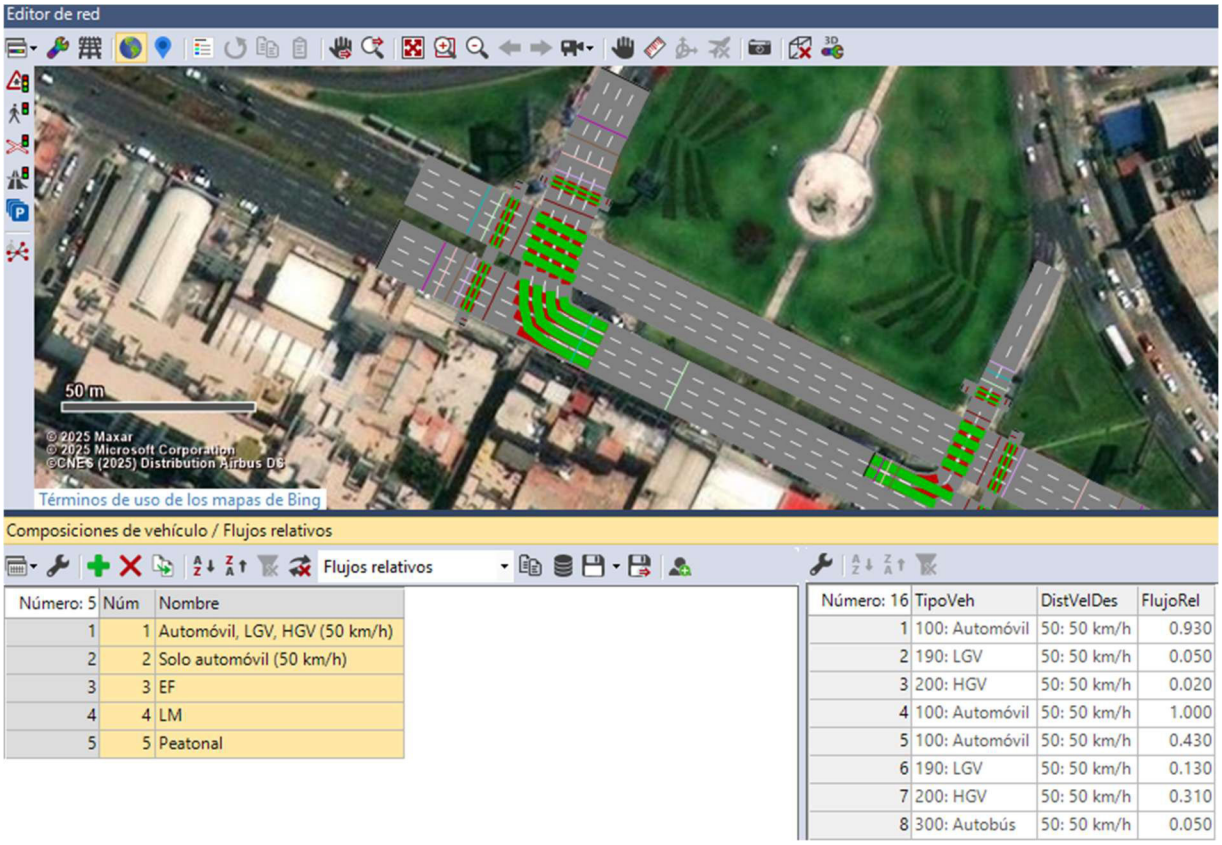


Figura 6 - Representación del modelo vial. Cruce: Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

II. Definición de los tipos de vehículos

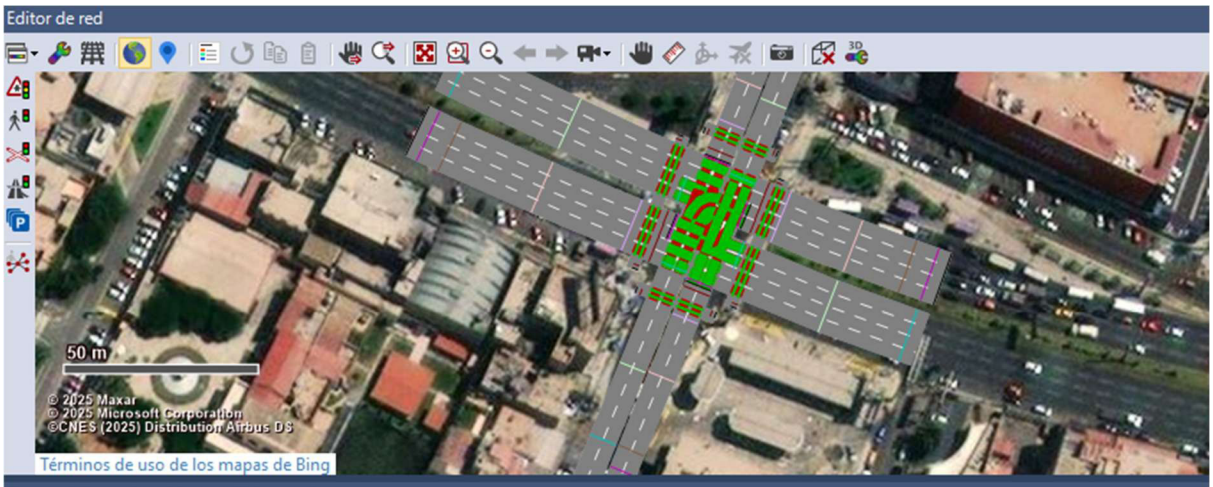
- Se añadieron las categorías de vehículos: autos, camionetas, buses y camiones con las respectivas distribuciones.



Número: 5	Núm	Nombre
1	1	Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)
2	2	Solo automóvil (50 km/h)
3	3	EF
4	4	LM
5	5	Peatonal

Número: 16	TipoVeh	DistVelDes	FlujoRel
1	100: Automóvil	50: 50 km/h	0.930
2	190: LGV	50: 50 km/h	0.050
3	200: HGV	50: 50 km/h	0.020
4	100: Automóvil	50: 50 km/h	1.000
5	100: Automóvil	50: 50 km/h	0.430
6	190: LGV	50: 50 km/h	0.130
7	200: HGV	50: 50 km/h	0.310
8	300: Autobús	50: 50 km/h	0.050

Figura 7 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.



Número: 5	Núm	Nombre
1	1	Automóvil, LGV, HGV (50 km/h)
2	2	Solo automóvil (50 km/h)
3	3	LM
4	4	RE
5	5	Peatonal

Número: 14	TipoVeh	DistVelDes	FlujoRel
1	100: Automóvil	50: 50	0.930
2	190: LGV	50: 50	0.050
3	200: HGV	50: 50	0.020
4	100: Automóvil	50: 50	1.000
5	100: Automóvil	50: 50	0.450
6	190: LGV	50: 50	0.080
7	200: HGV	50: 50	0.380
8	300: Autobús	50: 50	0.030
9	400: Tranvía	50: 50	0.050

Figura 8 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.

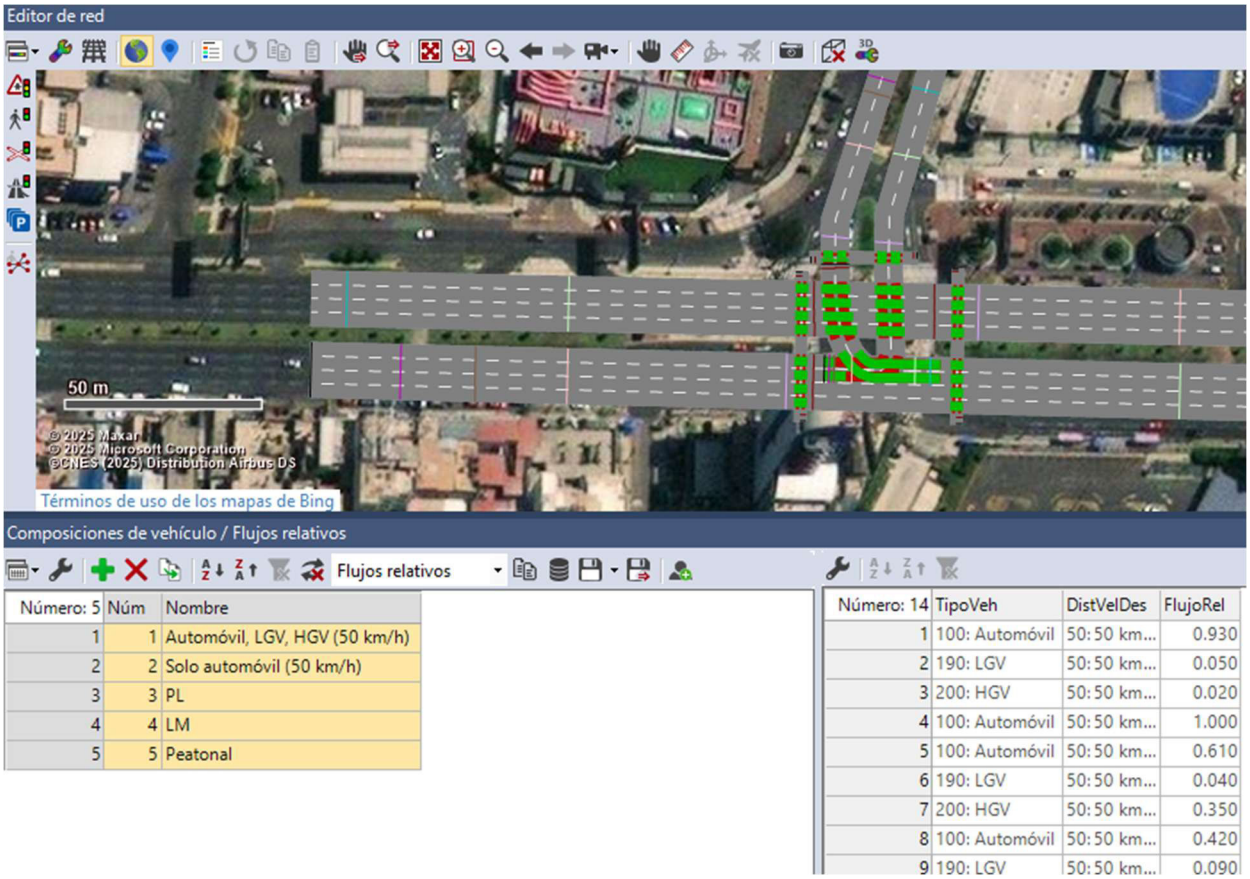


Figura 9 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas.

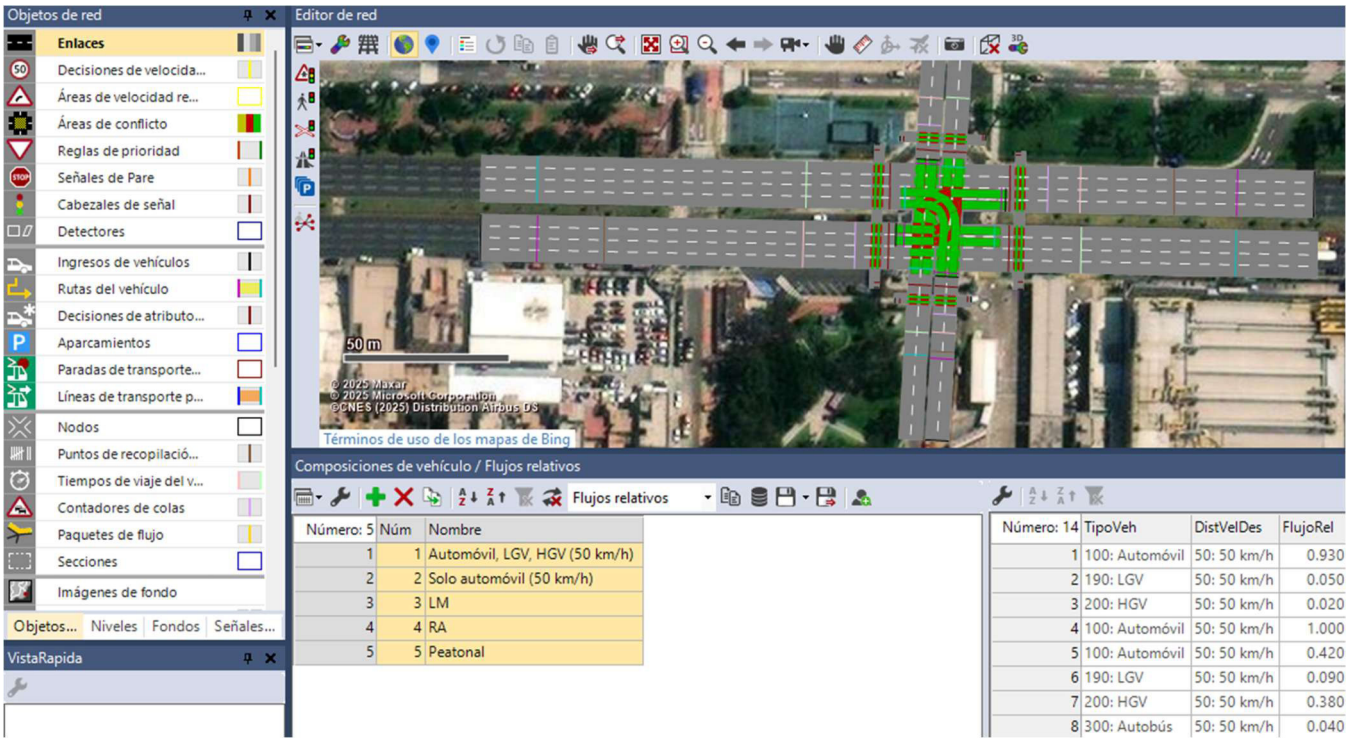
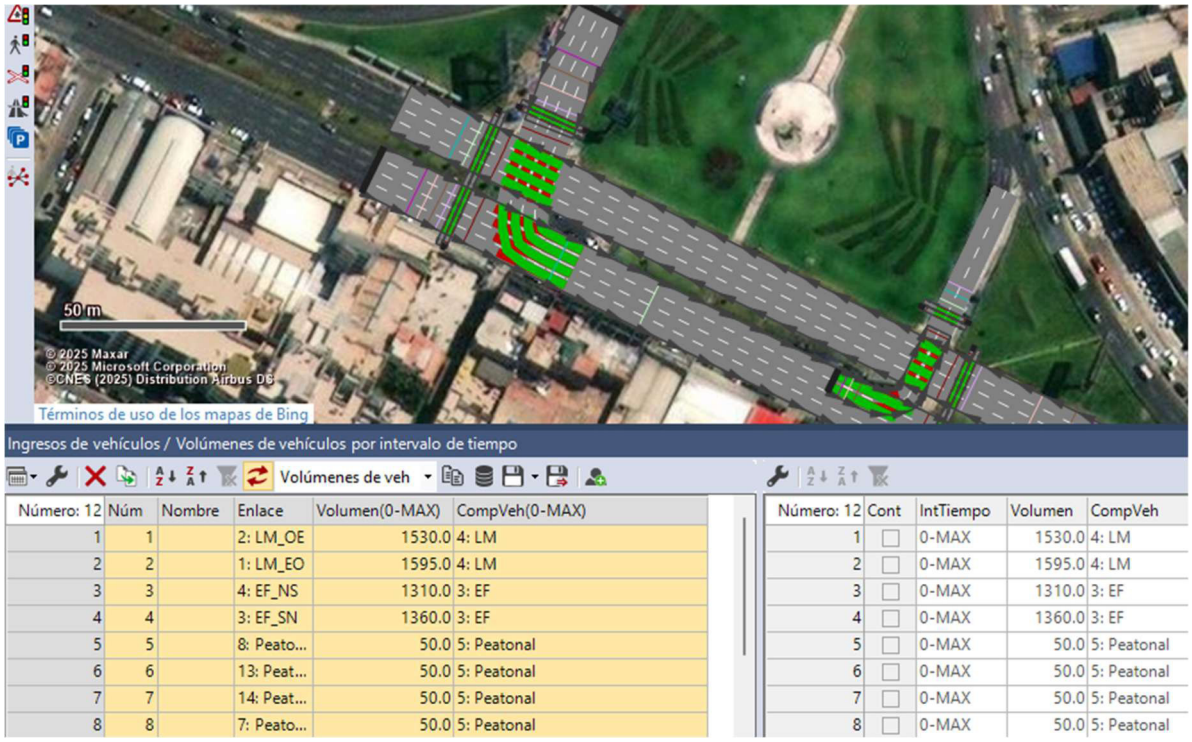


Figura 10 - Composición vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

III. Asignación del volumen vehicular

- En los puntos de entrada, se asignaron las tasas horarias estimadas en base a lo obtenido en campo. Estos datos fueron considerados a partir de los registros del Anexo N°1.



Ingresos de vehículos / Volúmenes de vehículos por intervalo de tiempo

Volúmenes de veh

Número: 12	Núm	Nombre	Enlace	Volumen(0-MAX)	CompVeh(0-MAX)
1	1		2: LM_OE	1530.0	4: LM
2	2		1: LM_EO	1595.0	4: LM
3	3		4: EF_NS	1310.0	3: EF
4	4		3: EF_SN	1360.0	3: EF
5	5		8: Peato...	50.0	5: Peatonal
6	6		13: Peat...	50.0	5: Peatonal
7	7		14: Peat...	50.0	5: Peatonal
8	8		7: Peato...	50.0	5: Peatonal

Número: 12	Cont	IntTiempo	Volumen	CompVeh
1	☐	0-MAX	1530.0	4: LM
2	☐	0-MAX	1595.0	4: LM
3	☐	0-MAX	1310.0	3: EF
4	☐	0-MAX	1360.0	3: EF
5	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
6	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
7	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
8	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal

Figura 11 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.



Ingresos de vehículos / Volúmenes de vehículos por intervalo de tiempo

Volúmenes de veh

Número: 16	Núm	Nombre	Enlace	Volumen(0-MAX)	CompVeh(0-MAX)
1	1		4: LM_OE	1381.0	3: LM
2	2		3: LM_EO	1337.0	3: LM
3	3		2: RE_SN	364.0	4: RE
4	4		1: RE_NS	297.0	4: RE
5	5		11: Peatones_OE2	50.0	5: Peatonal
6	6		12: Peatones_EO2	50.0	5: Peatonal
7	7		5: Peatones_SN1	50.0	5: Peatonal
8	8		6: Peatones_NS1	50.0	5: Peatonal
9	9		9: Peatones_EO1	50.0	5: Peatonal

Número: 16	Cont	IntTiempo	Volumen	CompVeh
1	☐	0-MAX	1381.0	3: LM
2	☐	0-MAX	1337.0	3: LM
3	☐	0-MAX	364.0	4: RE
4	☐	0-MAX	297.0	4: RE
5	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
6	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
7	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
8	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
9	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
10	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal

Figura 12 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.



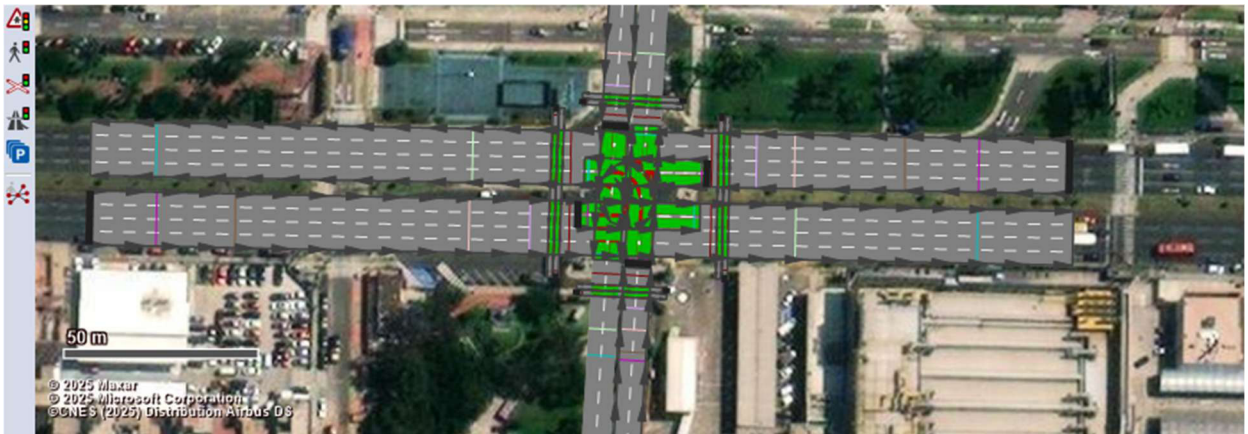
Ingresos de vehículos / Volúmenes de vehículos por intervalo de tiempo

Volúmenes de veh

Número: 11	Núm	Nombre	Enlace	Volumen(0-MAX)	CompVeh(0-MAX)
1	1		1: LM_EO	1437.0	4: LM
2	2		2: LM_OE	1481.0	4: LM
3	3		4: PL_NS	397.0	3: PL
4	4		3: PL_SN	464.0	3: PL
5	5		11: Peat...	50.0	5: Peatonal
6	6		12: Peat...	50.0	5: Peatonal
7	7		7: Peato...	50.0	5: Peatonal
8	8		8: Peato...	50.0	5: Peatonal
9	9		9: Peato...	50.0	5: Peatonal

Número: 11	Cont	IntTiempo	Volumen	CompVeh
1	☐	0-MAX	1437.0	4: LM
2	☐	0-MAX	1481.0	4: LM
3	☐	0-MAX	397.0	3: PL
4	☐	0-MAX	464.0	3: PL
5	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
6	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
7	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
8	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal
9	☐	0-MAX	50.0	5: Peatonal

Figura 13 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas.



Ingresos de vehículos / Volúmenes de vehículos por intervalo de tiempo

Volúmenes de veh

Número: 16	Núm	Nombre	Enlace	Volumen(0-MAX)	CompVeh(0-MAX)
1	1		1: LM_OE	1610.0	3: LM
2	2		2: LM_EO	1484.0	3: LM
3	3		4: RA_SN	380.0	4: RA
4	4		3: RA_NS	401.0	4: RA
5	5		8: LM_EO	100.0	4: RA
6	6		10: RA_...	50.0	3: LM
7	7		6: RA_NS	50.0	3: LM
8	8		7: LM_OE	100.0	4: RA

Número: 16	Cont	IntTiempo	Volumen	CompVeh
1	☐	0-MAX	1610.0	3: LM
2	☐	0-MAX	1484.0	3: LM
3	☐	0-MAX	380.0	4: RA
4	☐	0-MAX	401.0	4: RA
5	☐	0-MAX	100.0	4: RA
6	☐	0-MAX	50.0	3: LM
7	☐	0-MAX	50.0	3: LM
8	☐	0-MAX	100.0	4: RA

Figura 14 - Volumen vehicular del cruce Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

4.1.2 Configuración de la semaforización fija

I. Creación del controlador semafórico

- Se creó un controlador de tipo hora fija (Fixed-time).

II. Definición de grupos de señales (fases)

- Se asignaron las fases correspondientes a cada movimiento principal y secundario del cruce.

III. Asignación de tiempos de luces verde, ámbar y rojo

- Los tiempos fueron ingresados en base a lo observado en campo.

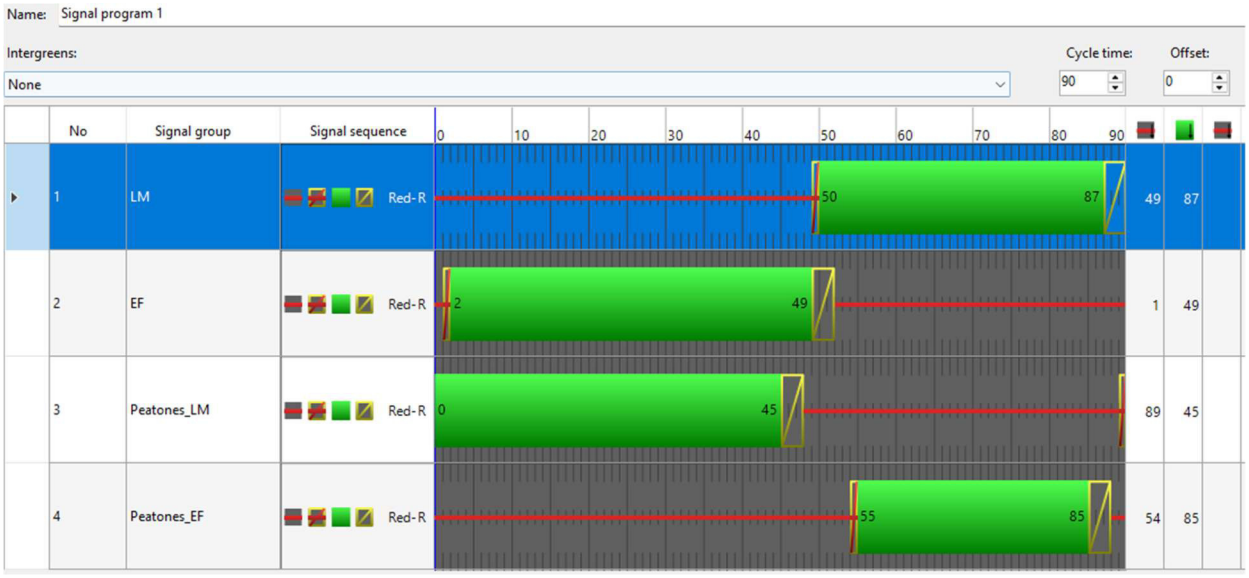


Figura 15 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.

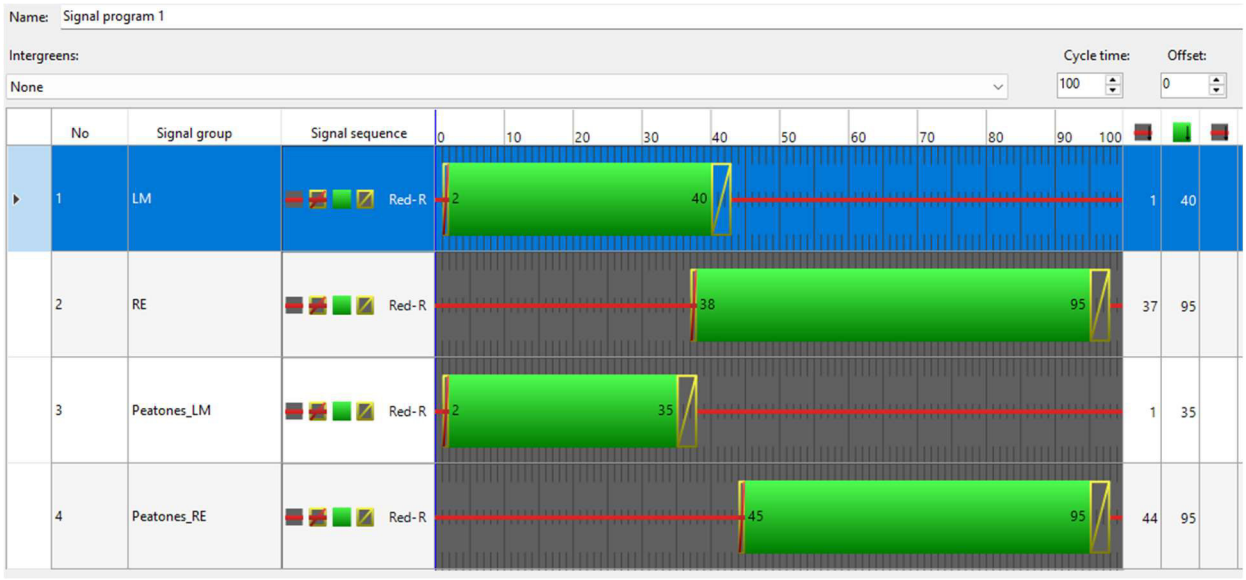


Figura 16 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.

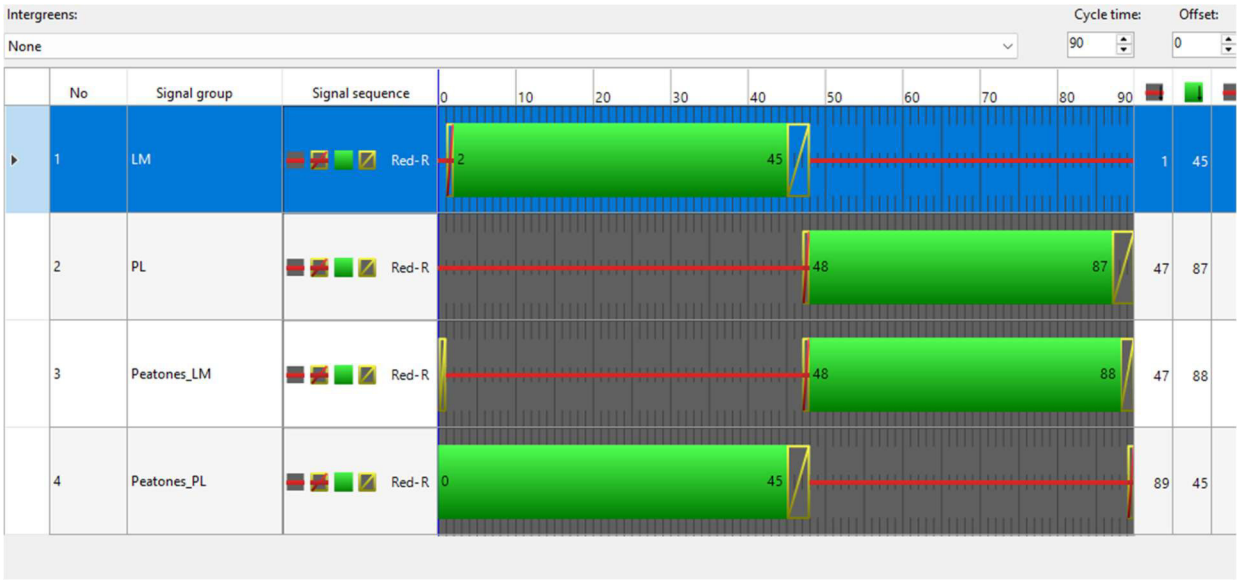


Figura 17 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas.

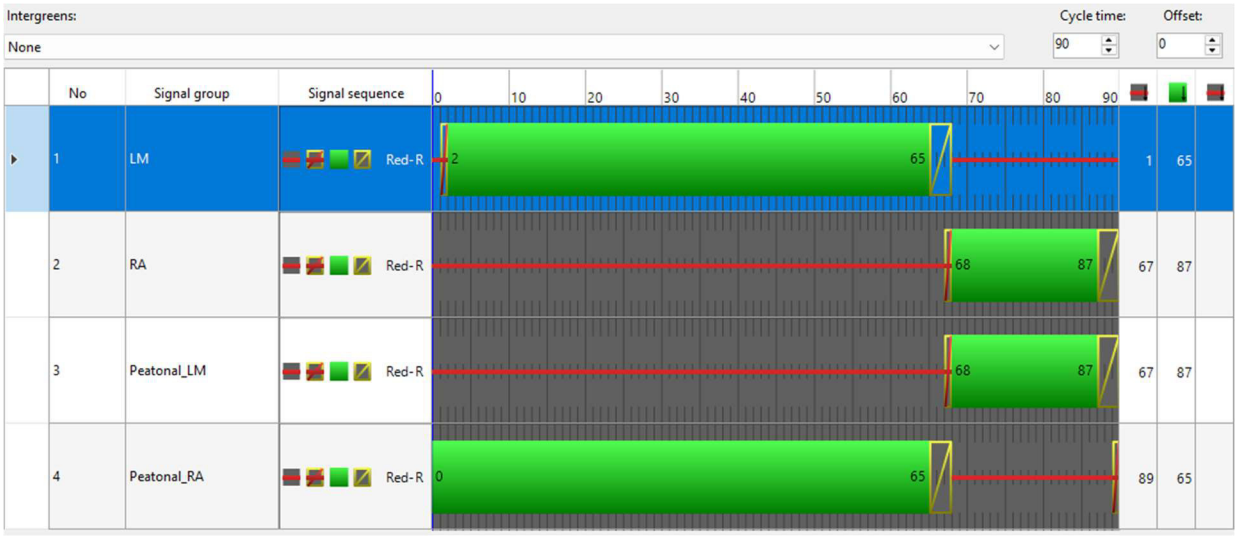


Figura 18 - Configuración de tiempos semafóricos fijos en cruce Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

IV. Asignación del controlador a las señales del modelo

- Cada semáforo virtual fue vinculado a su fase correspondiente en todos los casos.

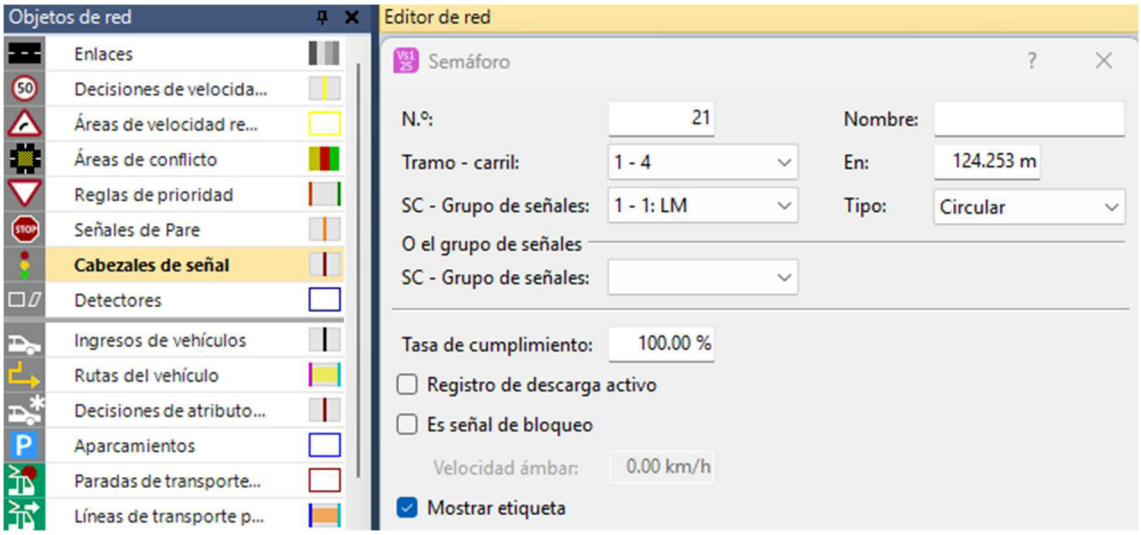


Figura 19 - Asignación de grupo de señales semafóricas de cabezales de señal por carril (semáforos).

4.1.3 Configuración de la simulación

I. Duración

- El tiempo de duración se configuró en un intervalo de 5 minutos para todos los casos.

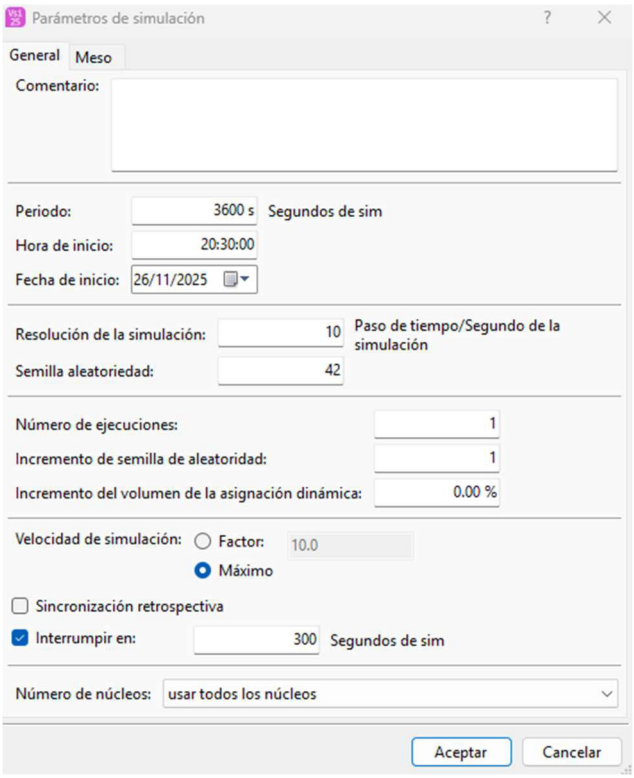


Figura 20 - Configuración de parámetros de simulación.

4.1.4 Exportación de los reportes

I. Generación de archivo (*.fzp)

- Se activó la exportación automática del reporte desde la opción: Evaluation/Configuration/Vehicle Record.
- Para cada vehículo observado, dicho archivo contiene las siguientes variables:
  - Tiempo de simulación.
  - ID del vehículo.
  - ID del tramo (link).
  - Número de carril.
  - Posición longitudinal.
  - Posición lateral.

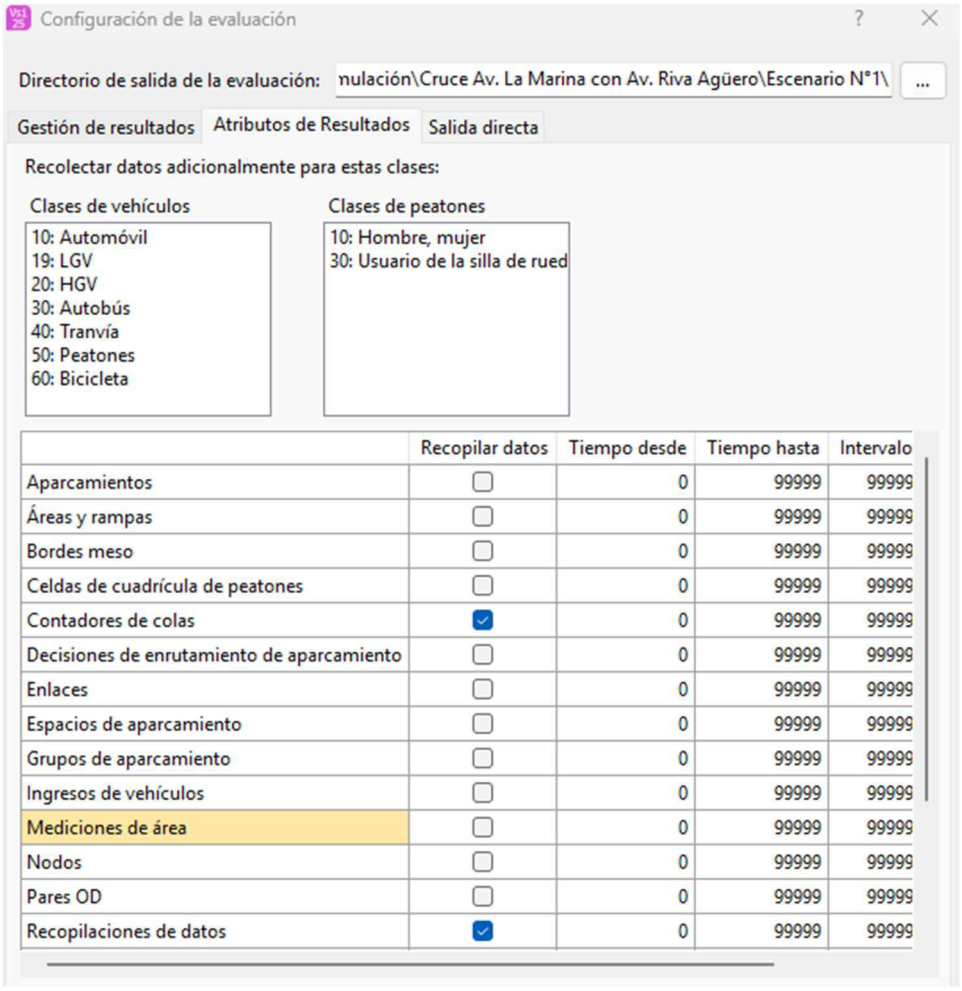


Figura 21 - Configuración de atributos de resultados.

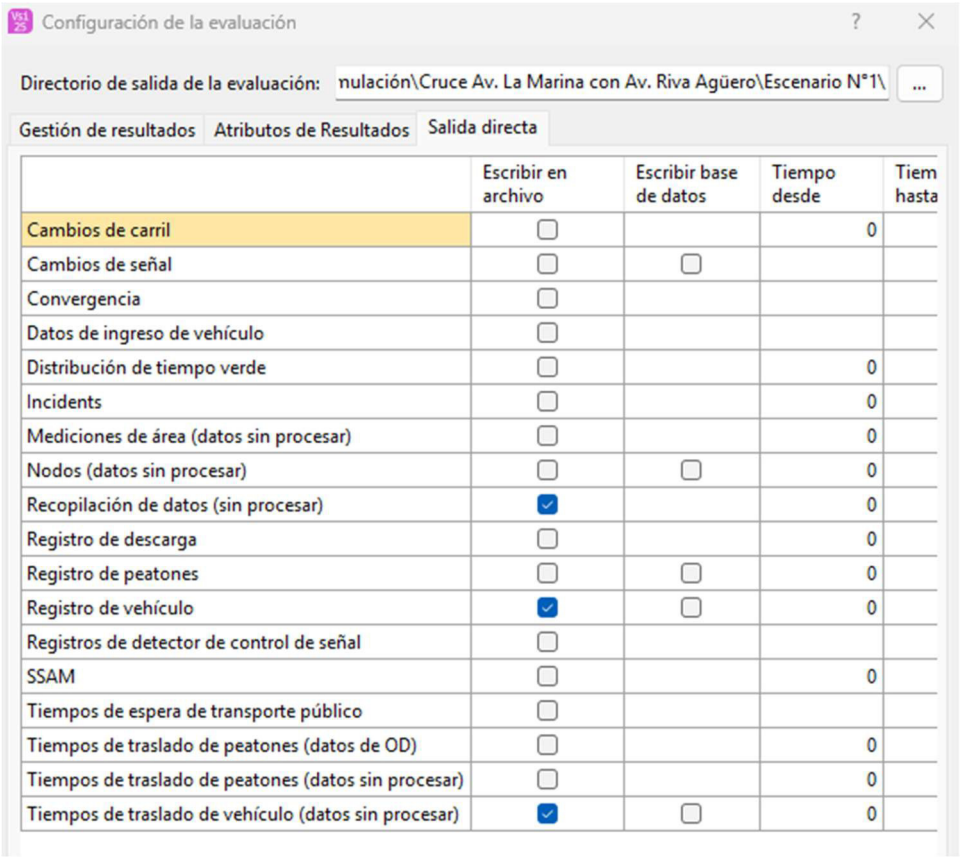


Figura 22 - Configuración de reportes de simulación.

4.1.5 Conversión de archivo (.fzp) a MS Excel mediante Python*

Con el fin de procesar la información, se utilizó el software Python para convertir el archivo (*.fzp) a formato (*.xlsx). Este procesamiento incluyó lo siguiente:

- Lectura del texto delimitado.
- Limpieza de datos.
- Reestructuración del formato para el análisis posterior en cada uno de los cruces.

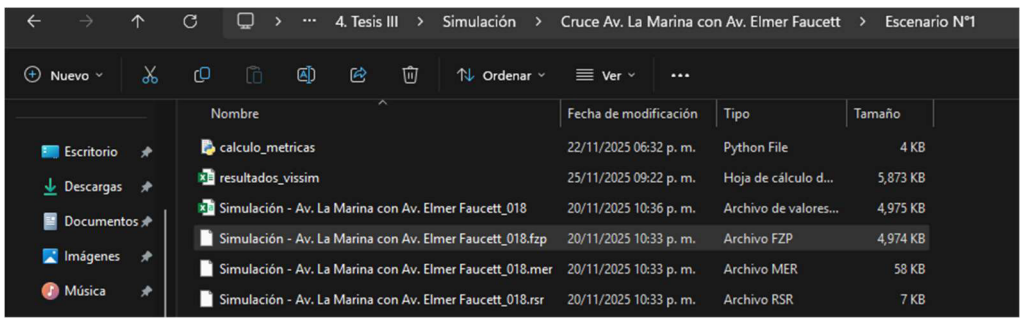
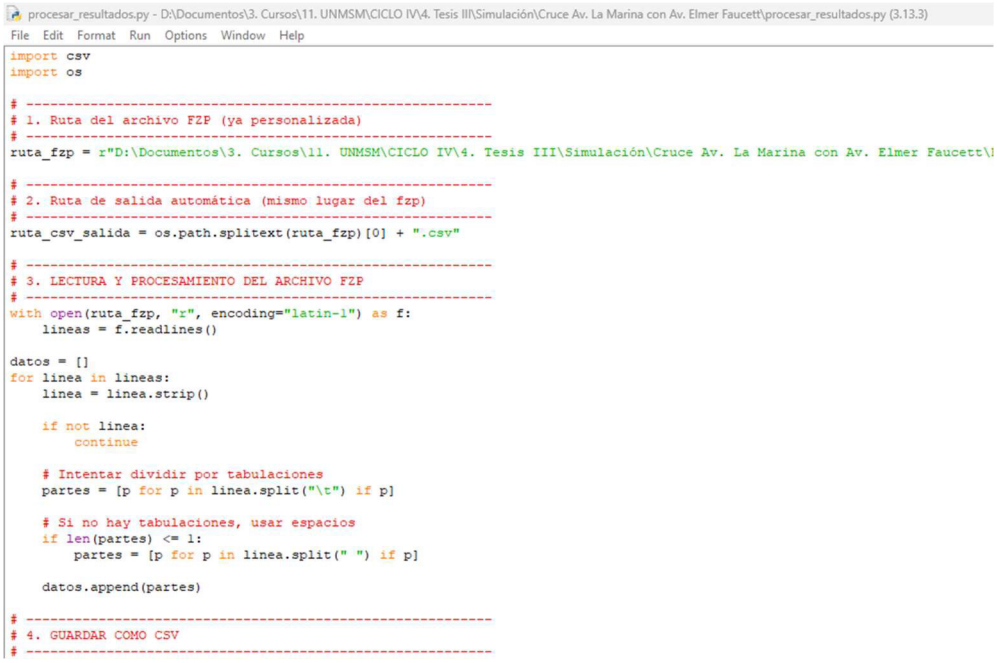


Figura 23 - Obtención de reporte de Vissim (.fzp).*



```
procesar_resultados.py - D:\Documentos\3. Cursos\11. UNMSM\CICLO IV\4. Tesis III\Simulación\Cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett\procesar_resultados.py (3.13.3)
File  Edit  Format  Run  Options  Window  Help
import csv
import os

# ------------------------------------------------------------
# 1. Ruta del archivo FZP (ya personalizada)
# ------------------------------------------------------------
ruta_fzp = r"D:\Documentos\3. Cursos\11. UNMSM\CICLO IV\4. Tesis III\Simulación\Cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett\I

# ------------------------------------------------------------
# 2. Ruta de salida automática (mismo lugar del fzp)
# ------------------------------------------------------------
ruta_csv_salida = os.path.splitext(ruta_fzp)[0] + ".csv"

# ------------------------------------------------------------
# 3. LECTURA Y PROCESAMIENTO DEL ARCHIVO FZP
# ------------------------------------------------------------
with open(ruta_fzp, "r", encoding="latin-1") as f:
    lineas = f.readlines()

datos = []
for linea in lineas:
    linea = linea.strip()

    if not linea:
        continue

    # Intentar dividir por tabulaciones
    partes = [p for p in linea.split("\t") if p]

    # Si no hay tabulaciones, usar espacios
    if len(partes) <= 1:
        partes = [p for p in linea.split(" ") if p]

    datos.append(partes)

# ------------------------------------------------------------
# 4. GUARDAR COMO CSV
# ------------------------------------------------------------
```

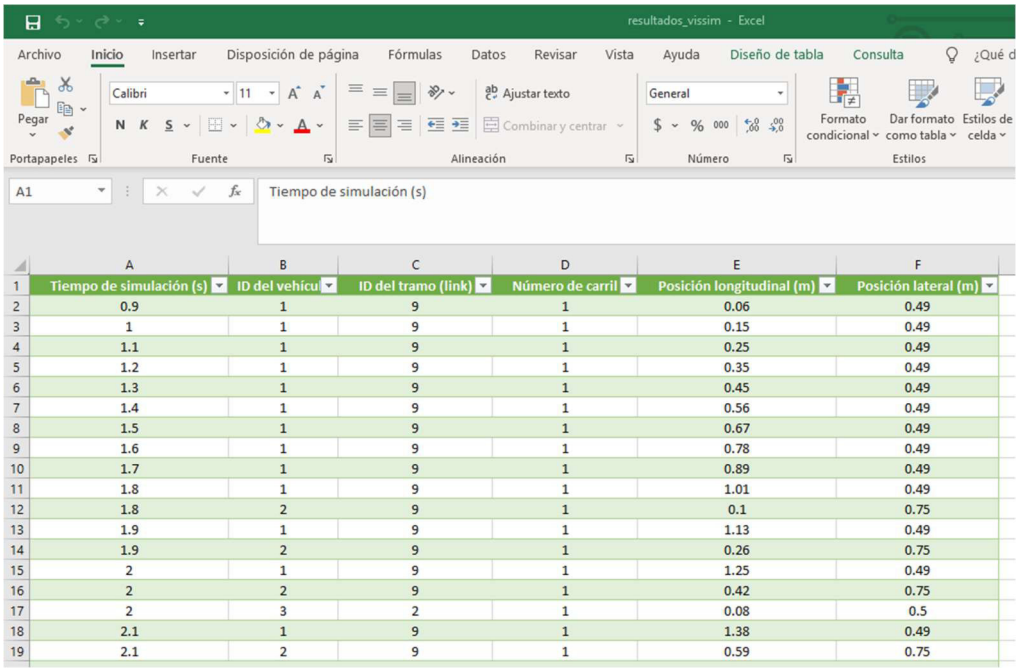
Figura 24 - Script de conversión en Python para lectura de archivo de reporte (.fzp).*

El script de conversión completo en Python se presenta en el Anexo N°3. Cabe precisar que dicho script se emplea en todos los casos para convertir el archivo de reporte (*.fzp) a formato (*.csv); la única variación necesaria es la actualización de la lectura del archivo de entrada correspondiente al reporte que se desea procesar.

4.1.6 Procesamiento de las métricas

Con el archivo en formato (*.csv) ya generado, se creó un nuevo libro de MS Excel que realiza una consulta a dicho archivo con el fin de obtener un documento en formato (*.xlsx), plenamente legible y procesable. A partir de ello, se ejecutó un segundo script en Python para calcular los siguientes valores:

- Velocidad instantánea y promedio.
- Tiempo de viaje.
- Flujo vehicular.
- Densidad.
- Ocupación.
- Longitud máxima de cola.



resultados_vissim - Excel

Archivo Inicio Insertar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda Diseño de tabla Consulta ¿Qué d

Pegar Portapapeles Calibri 11 Fuente Ajustar texto Combinar y centrar Alineación General Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Estilos

A1 Tiempo de simulación (s)

	A	B	C	D	E	F
1	Tiempo de simulación (s)	ID del vehícu	ID del tramo (link)	Número de carril	Posición longitudinal (m)	Posición lateral (m)
2	0.9	1	9	1	0.06	0.49
3	1	1	9	1	0.15	0.49
4	1.1	1	9	1	0.25	0.49
5	1.2	1	9	1	0.35	0.49
6	1.3	1	9	1	0.45	0.49
7	1.4	1	9	1	0.56	0.49
8	1.5	1	9	1	0.67	0.49
9	1.6	1	9	1	0.78	0.49
10	1.7	1	9	1	0.89	0.49
11	1.8	1	9	1	1.01	0.49
12	1.8	2	9	1	0.1	0.75
13	1.9	1	9	1	1.13	0.49
14	1.9	2	9	1	0.26	0.75
15	2	1	9	1	1.25	0.49
16	2	2	9	1	0.42	0.75
17	2	3	2	1	0.08	0.5
18	2.1	1	9	1	1.38	0.49
19	2.1	2	9	1	0.59	0.75

Figura 25 - Reporte de resultados en formato MS Excel.



calculo_metricas.py - D:\Documentos\3. Cursos\11. UNMSM\CICLO IV\4. Tesis III\Simulación\Cruce Av. La Marina con Av. Elmer Faucett\Escenario N°1\calculo_metricas.py (3.13.3)

File Edit Format Run Options Window Help

```
import pandas as pd
import numpy as np

# ============================================
# 1. LECTURA DEL ARCHIVO
# ============================================

df = pd.read_excel("resultados_vissim.xlsx")

# Renombrar columnas a nombres internos más simples
df = df.rename(columns={
    "Tiempo de simulación (s)": "time",
    "ID del vehículo": "veh_id",
    "ID del tramo (link)": "link_id",
    "Número de carril": "lane",
    "Posición longitudinal (m)": "pos",
    "Posición lateral (m)": "lat_pos"
})

# Ordenar por vehículo y tiempo
df = df.sort_values(["veh_id", "time"])


# ============================================
# 2. VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s y km/h)
# ============================================

df["dpos"] = df.groupby("veh_id")["pos"].diff()
df["dt"] = df.groupby("veh_id")["time"].diff()

df["vel"] = df["dpos"] / df["dt"]                    # m/s
df["vel_kmh"] = df["vel"] * 3.6                      # km/h


# ============================================
# 3. TIEMPO DE VIAJE PROMEDIO
# ============================================

tt = df.groupby("veh_id").agg(
```

Figura 26 - Script en Python para el cálculo de métricas.

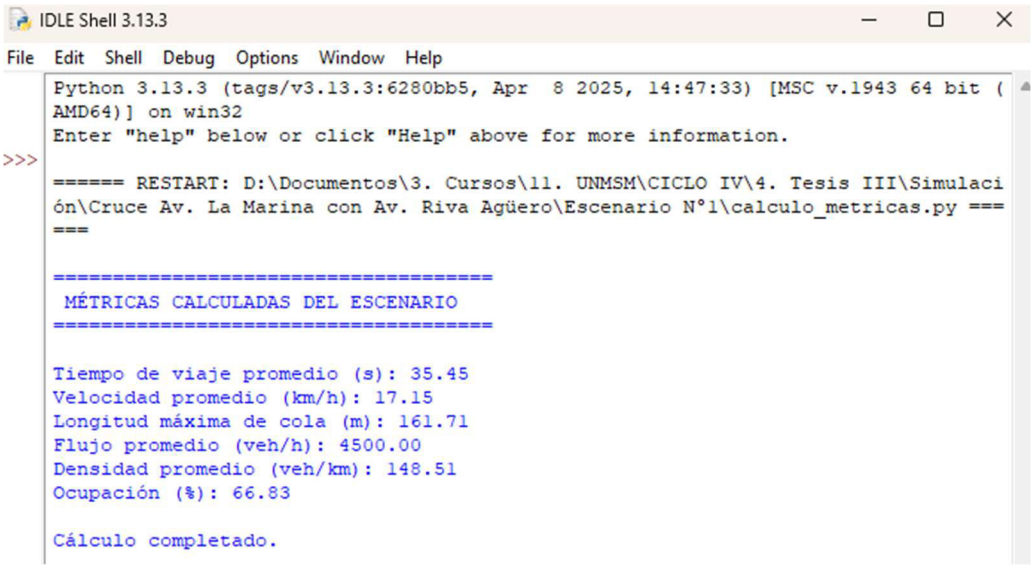


Figura 27 - Resultado del cálculo de métricas.

El script completo de cálculo de métricas en Python se presenta en el Anexo N°4. Cabe precisar que dicho script se emplea en todos los casos, tanto de cada cruce o incluso para los escenarios adaptativos, en donde se está planteando el cálculo para una distancia parametrizada de 300 metros.

4.2. Desarrollo del escenario adaptativo

Con la diferencia respecto al escenario con tiempos fijos, el escenario adaptativo no requirió reconstruir toda la modelación, sino que el procedimiento fue:

I. Duplicar el archivo de cada cruce con control fijo

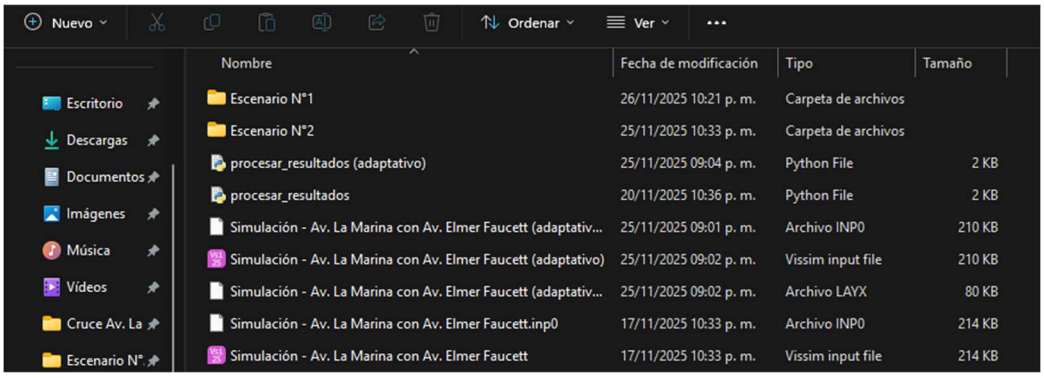


Figura 28 - Duplicidad de archivos del modelamiento para preparar escenarios adaptativos.

II. Agregar detectores de presencia

- Fueron ubicados antes de la línea de detención de cada fase.

- Los detectores se conectaron al controlador para activar el cambio de fase de acuerdo con la demanda.

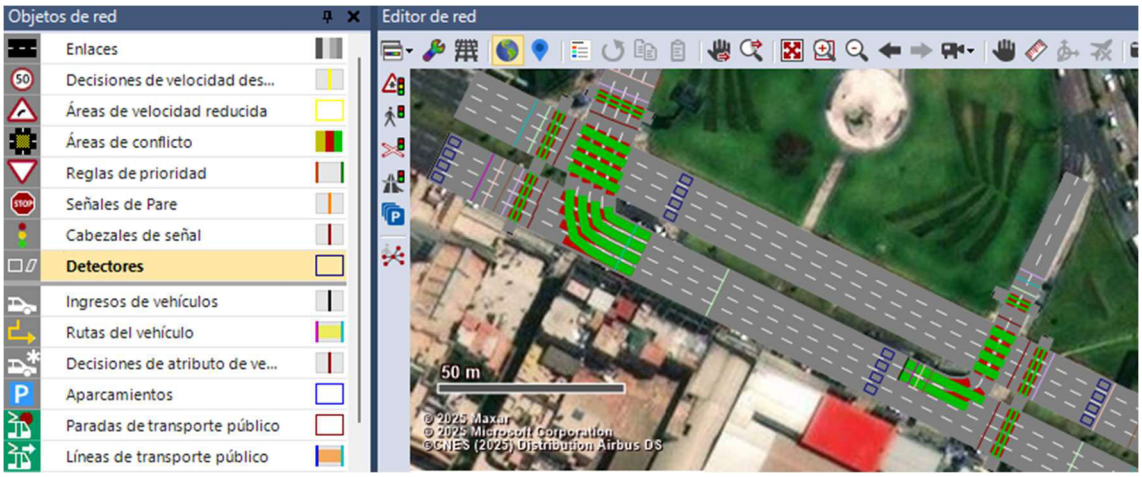


Figura 29 - Utilización de detectores en modelamiento de cada cruce.

III. Cambiar el tipo de controlador

- Para la construcción de este escenario, se reemplazó el controlador de tiempo fijo por un controlador de dos etapas con detección vehicular, disponible en la versión estudiantil de PTV Vissim 2025 (SP09). Es importante señalar que esta versión educativa presenta limitaciones funcionales, ya que no permite configurar un sistema adaptativo completo bajo estándares avanzados. Sin embargo, se implementó la mejor aproximación posible dentro de las capacidades del software mediante la utilización de detectores de presencia, activación de fases según demanda y la definición de tiempos mínimos de verde para cada etapa. Dichas configuraciones, permitieron simular una lógica basada en la respuesta al volumen vehicular, lo cual constituye una representación válida para los fines de esta investigación.

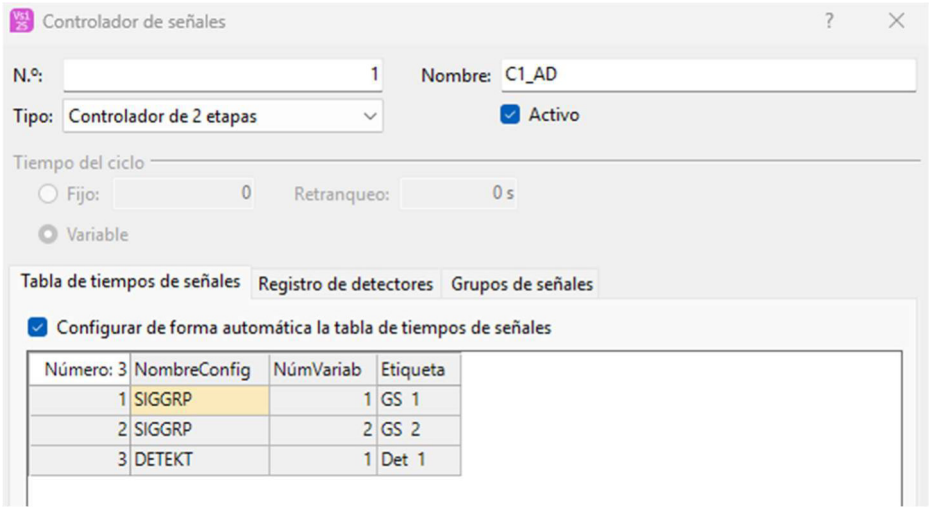


Figura 30 - Configuración del tipo de controlador semafórico.

IV. Configuración de los tiempos mínimos de verde

- Se asignaron según el análisis del flujo de vehículos principal y secundario.

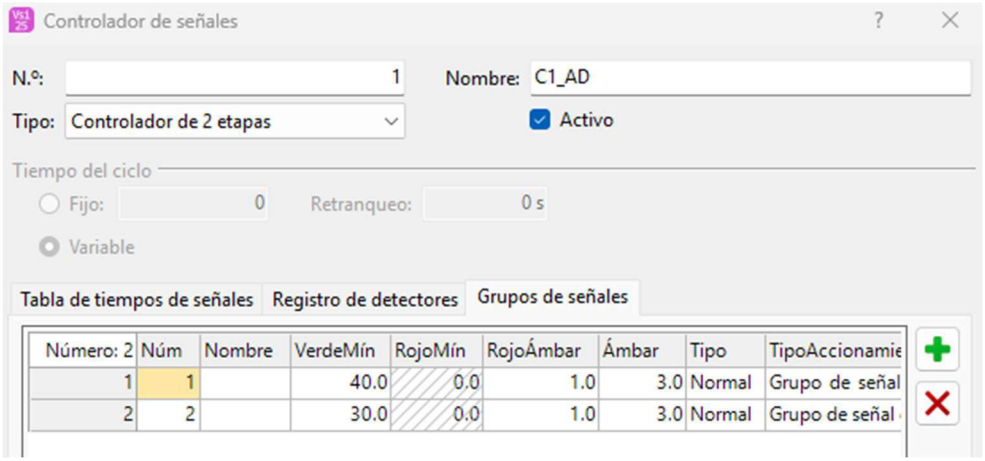


Figura 31 - Configuración de tiempos de fases.

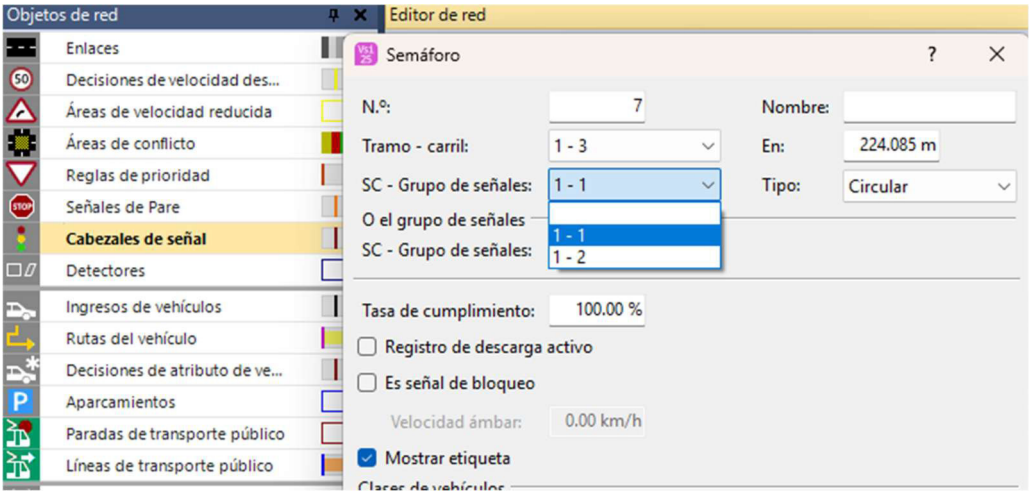


Figura 32 - Asignación de nuevas fases semafóricas en modelamiento.

V. Ejecutar la simulación
   - Se repitió la generación del archivo (*.fzp).

VI. Convertir el archivo (*.fzp) a MS Excel mediante Python
   - Se utilizó el mismo script del escenario fijo.

VII. Ejecutar el script de cálculo de métricas
   - Se obtuvieron los mismos indicadores del escenario base, permitiendo la comparación.

4.3. Presentación de resultados y discusión por cruce

A continuación, se presentan los resultados de ambos escenarios por cada uno de los cruces. Cada subsección incluye:

- Tabla comparativa del escenario fijo vs. adaptativo.
- Discusión de los indicadores.
- Interpretación de la mejora.
- Conclusión previa antes de pasar al análisis del siguiente cruce.

4.3.1 Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett

Para este cruce, tras la evaluación de los escenarios de temporización fija y adaptativa, muestran que la implementación del control adaptativo produjo mejoras relevantes: el tiempo de viaje promedio se redujo de 60.97seg. a 48.59seg. (-20.3%), mientras que la velocidad promedio aumentó de 5.82 km/h a 11.36 km/h (+95.1%). Del mismo modo, el flujo promedio se incrementó de 3,792 veh/hora a 4,440 veh/hora (+17.1%), lo que indica una mayor capacidad de procesamiento del cruce en el esquema adaptativo. En simultáneo, se observó una reducción de la densidad promedio (-6.7%) y de la ocupación del tramo (-6.6%), lo cual sugiere una menor saturación; no obstante, la longitud máxima de cola mostró un leve incremento (+2.6%), probablemente asociado al mayor flujo procesado en horas de máximo tránsito y las limitaciones del escenario adaptativo implementado, al contar con la versión estudiantil del software. En conjunto, los resultados apoyan la hipótesis de que un control semafórico sensible a la demanda vehicular puede mejorar la fluidez y capacidad

del cruce, pese a las restricciones del entorno de simulación. Dichos resultados son mostrados en la Tabla N°9.

Tabla 9 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.

Indicador	Escenario 1 (Fijo)	Escenario 2 (Adaptativo)	Variación (%)
Tiempo de viaje promedio (s)	60.97	48.59	**-20.30%**
Velocidad promedio (km/h)	5.82	11.36	**95.10%**
Longitud máxima de cola (m)	208.54	213.88	**2.60%**
Flujo promedio (veh/h)	3,792	4,440	**17.10%**
Densidad promedio (veh/km)	215.01	200.7	**-6.70%**
Ocupación (%)	96.75	90.31	**-6.60%**

En el escenario actual, el cruce presenta un nivel de servicio C en base a lo calculado en el Anexo N°2, lo cual coincide con un flujo estable, pero cercano a condiciones de congestión moderada. Tras aplicar el escenario adaptativo, se observa una reducción apreciable en el tiempo de viaje y casi una duplicación de la velocidad promedio. Estos resultados sugieren que, bajo una operación en escenario adaptativo, el desempeño del cruce mejora dentro del mismo rango operacional y se acerca a condiciones propias de un escenario B-C, manteniéndose aún en un escenario estable, pero con mayor fluidez y menor percepción de demoras. Pese a que la longitud máxima de cola no disminuyó, el incremento del flujo y la reducción de la densidad respaldan esta mejora operativa.

4.3.2 Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó

En este cruce, tras la evaluación de los escenarios de temporización fija y adaptativa, muestran que la implementación de la lógica adaptativa generó mejoras relevantes: el tiempo de viaje promedio se redujo de 41.54seg. a 27.48seg. (-33.9%), mientras que la velocidad promedio aumentó de 8.30 km/h a 14.84 km/h (+78.7%), reflejando un tránsito más fluido. Del mismo modo, el flujo promedio se incrementó de 3,252 veh/hora a 3,948 veh/hora (+21.4%), lo que indica una mayor capacidad de procesamiento del cruce en el esquema adaptativo. En simultáneo, se observó que la longitud máxima de cola se redujo

de 89.68 m a 69.23 m (-22.8%), lo que sugiere un vaciado más rápido del cruce durante los ciclos semafóricos. Asimismo, se observó una reducción de la densidad promedio (-19.6%) y de la ocupación del tramo (-11.1%), lo cual sugiere una menor saturación. En conjunto, los resultados afirman que la introducción de un control semafórico adaptativo genera mejoras tangibles en la movilidad y desempeño del cruce, validando su pertinencia como alternativa de optimización frente al esquema semafórico de temporización fija, incluso a pesar de las limitaciones en la selección del controlador semafórico dentro de Vissim para la simulación. Los resultados detallados son mostrados en la Tabla N°10.

Tabla 10 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.

Indicador	Escenario 1 (Fijo)	Escenario 2 (Adaptativo)	Variación (%)
Tiempo de viaje promedio (s)	41.54	27.48	**-33.90%**
Velocidad promedio (km/h)	8.3	14.84	**78.70%**
Longitud máxima de cola (m)	89.68	69.23	**-22.80%**
Flujo promedio (veh/h)	3,252	3,948	**21.40%**
Densidad promedio (veh/km)	125.71	101.1	**-19.60%**
Ocupación (%)	56.57	45.5	**-11.10%**

Según lo obtenido en el Anexo N°2, este cruce opera en la actualidad bajo un nivel de servicio de E, reflejando condiciones cercanas a la saturación, con demoras elevadas y un uso intensivo de la capacidad disponible. Con la implementación del escenario adaptativo, los indicadores mejoran significativamente. Por un lado, el tiempo de viaje se reduce en más de un 30%, la velocidad promedio aumenta y la longitud máxima de cola disminuye. Estas mejoras indicarían que, aun cuando existen condiciones exigentes, el cruce podría transitar a un nivel de servicio D, mostrando un funcionamiento menos crítico y una reducción clara de la congestión, aunque sin alcanzar niveles de servicio aceptables.

4.3.3 Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas

Para el caso de este cruce, tras la evaluación de los escenarios de temporización fija y adaptativa, muestran que la implementación de la tecnología adaptativa

muestra mejoras moderadas pero consistentes. En particular, el tiempo de viaje promedio se redujo de 42.52 seg. a 37.02 seg. (-12.9%), mientras que la velocidad promedio incrementó de 14.47 km/h a 18.42 km/h (+27.3%), evidenciando una mayor fluidez en la circulación. Del mismo modo, el flujo promedio también mostró un incremento, pasando de 4,344 veh/hora a 4,524 veh/hora (+4.1%), lo que determina una ligera mejora en la capacidad del cruce. En relación con la densidad y ocupación, ambas disminuyeron (-9.3% en ambos casos), sugiriendo una reducción de la saturación vehicular en la zona. No obstante, la longitud máxima de cola presentó un aumento de 131.92 m a 143.22 m (+8.5%), lo que podría explicarse con picos de llegada más concentrados en determinados intervalos de tiempo o por las limitaciones propias de la simulación por control adaptativo que ofrece la versión estudiantil de Vissim. Pese a ello, los indicadores globales señalan que el esquema adaptativo ofrece un desempeño superior al sistema semafórico fijo, respaldando su conveniencia para este cruce. Los resultados descritos, son mostrados en la Tabla N°11.

Tabla 11 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas.

Indicador	Escenario 1 (Fijo)	Escenario 2 (Adaptativo)	Variación (%)
Tiempo de viaje promedio (s)	42.52	37.02	**-12.90%**
Velocidad promedio (km/h)	14.47	18.42	**27.30%**
Longitud máxima de cola (m)	131.96	143.22	**8.50%**
Flujo promedio (veh/h)	4,344	4,524	**4.10%**
Densidad promedio (veh/km)	171.48	155.56	**-9.30%**
Ocupación (%)	77.16	70	**-9.30%**

Este cruce presenta en su estado actual un nivel de servicio B, en base a lo detallado en el Anexo N°2. Está caracterizado por buenas condiciones de operación, fluidez aceptable y demoras reducidas. Con el escenario adaptativo, se evidencia una mejora moderada en los tiempos de viaje y velocidad promedio, junto con una ligera reducción de la densidad y ocupación. Aunque la cola máxima se incrementa, el desempeño general se mantiene dentro de un entorno operativo aceptable. Por tal motivo, el cruce mantendría un nivel de servicio similar de B en el escenario adaptativo, aunque con una operación más estable y menos sensible a variaciones de demanda.

4.3.4 Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero

Los resultados de la evaluación de los escenarios de este cruce, de temporización fija y adaptativa, muestran diferencias marginales de ambos escenarios, evidenciando que el comportamiento del cruce se encuentra relativamente estabilizado en ambos casos. En líneas generales, el escenario adaptativo presenta mejoras ligeras en parámetros como el flujo promedio (+4.8%) y una pequeña reducción en la longitud máxima de cola (-1.5%). Asimismo, el tiempo de viaje muestra una reducción leve (-0.7%), aunque la velocidad promedio prácticamente no varía entre uno y otro escenario (-0.06%). Por otra parte, se observa un incremento moderado en densidad y ocupación (+4% en ambos casos), lo cual puede deberse a la mayor cantidad de vehículos perfectamente procesados bajo la lógica adaptativa. Si bien es cierto que las mejoras absolutas son menores en comparación con el análisis planteado para los demás cruces, estos resultados demuestran que la semaforización adaptativa permite un uso ligeramente más eficiente del cruce en términos de capacidad y vaciado, incluso cuando la magnitud del beneficio es más reducida. El detalle de los resultados obtenidos para este cruce es mostrado en la Tabla N°12.

Tabla 12 - Comparación de escenarios de simulación. Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

Indicador	Escenario 1 (Fijo)	Escenario 2 (Adaptativo)	Variación (%)
Tiempo de viaje promedio (s)	35.45	35.19	**-0.70%**
Velocidad promedio (km/h)	17.15	17.14	**-0.06%**
Longitud máxima de cola (m)	161.71	159.29	**-1.50%**
Flujo promedio (veh/h)	4,500	4,716	**4.80%**
Densidad promedio (veh/km)	148.51	154.51	**4.00%**
Ocupación (%)	66.83	69.53	**4.00%**

El escenario actual ubica a este cruce dentro de un nivel de servicio D, en base a lo obtenido en el Anexo N°2. Está caracterizado por un nivel de flujo restringido, con demoras moderadas y una operación cercana al límite de la estabilidad. Tras la aplicación del escenario adaptativo, los cambios observados son marginales. En principio, el tiempo de viaje se reduce levemente en un 0.7%; la velocidad se mantiene prácticamente igual y la longitud máxima de cola disminuye levemente.

Pese a que el flujo se incrementa, el comportamiento global no muestra una variación significativa en la calidad del servicio, por lo que el cruce mantendría el nivel de servicio D bajo la configuración adaptativa. La ligera mejora sugiere un uso más eficiente de las luces verdes, pero sin impactar lo suficiente como para modificar el nivel de servicio.

4.4. Contrastación estadística de hipótesis

Con el fin de determinar si las diferencias observadas entre el escenario de temporización fija y el escenario de control adaptativo son estadísticamente relevantes, se empleó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. En línea con ello, se realizó una contrastación de hipótesis respecto a una de las principales métricas del tráfico vehicular: el tiempo de viaje.

A partir de la simulación desarrollada en el software PTV Vissim, se obtuvieron los datos individuales de desempeño correspondientes a cada vehículo que circula por la intersección analizada, considerando tanto el escenario convencional como el adaptativo. En particular, se analizaron los registros de 200 vehículos por cada condición simulada.

Dado que se comparan mediciones provenientes de dos configuraciones aplicadas sobre la misma intersección y bajo condiciones controladas de simulación, se empleó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas, utilizando el software SPSS.

Para efectos de la contrastación estadística mediante la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon, se formulan las siguientes hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (H0): No existen diferencias estadísticamente significativas en los tiempos de viaje entre el escenario con semaforización tradicional y el escenario con semaforización inteligente.
- Hipótesis alternativa (H1): Existen diferencias estadísticamente significativas en los tiempos de viaje entre el escenario con semaforización tradicional y el escenario con semaforización inteligente.

4.4.1 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett

Con el objetivo de evaluar si la reducción del tiempo de viaje observada entre el escenario de temporización fija y el escenario adaptativo es estadísticamente significativa, se aplicó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas, dado que los datos no cumplen con el supuesto de normalidad según la prueba de Shapiro-Wilk ($p<0.05$).

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
tiempo_fijo	,195	200	<.001	,776	200	<.001
tiempo_adaptativo	,199	200	<.001	,754	200	<.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Figura 33 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del primer cruce.

Los resultados muestran que, de los 200 vehículos analizados, en 100 casos el tiempo de viaje bajo el escenario adaptativo fue menor que en el escenario convencional, mientras que en 98 casos se observó un incremento y en 2 casos, no se registraron diferencias. Sin embargo, el mayor rango promedio asociado a los rangos negativos evidencia que las reducciones del tiempo de viaje presentan una magnitud superior a los incrementos registrados.

Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
tiempo_adaptativo - tiempo_fijo	Rangos negativos	100[a]	114,12	11411,50
	Rangos positivos	98[b]	84,59	8289,50
	Empates	2[c]		
	Total	200		

a. tiempo_adaptativo < tiempo_fijo

b. tiempo_adaptativo > tiempo_fijo

c. tiempo_adaptativo = tiempo_fijo

Figura 34 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del primer cruce.

Estadísticos de prueba[a]

	tiempo_adaptativo - tiempo_fijo
Z	-1,934[b]
Sig. asin. (bilateral)	,053

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos positivos.

Figura 35 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del primer cruce.

El estadístico de prueba obtenido (Z = -1,934) y su nivel de significancia (p = 0.053) indican una tendencia favorable hacia la mejora del desempeño del sistema semafórico adaptativo en términos de tiempos de viaje, situándose próximo al umbral de significancia estadística. En conjunto con los resultados operativos obtenidos en la simulación, estos hallazgos respaldan la efectividad del control semafórico adaptativo para la mejora del desempeño del tráfico en la intersección analizada.

4.4.2 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó

Con el objetivo de evaluar la significancia estadística de las mejoras observadas del segundo cruce analizado, se realizó una contrastación de hipótesis sobre el tiempo de viaje promedio, comparando el escenario de temporización fija con el escenario de control semafórico adaptativo. Previamente, se aplicaron las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk, obteniéndose valores de significancia que sugieren que los datos no siguen una distribución normal ($p<0.05$).

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
tiempo_fijo	,185	200	<.001	,859	200	<.001
tiempo_adaptativo	,198	200	<.001	,828	200	<.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Figura 36 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del segundo cruce.

En consecuencia, se aplicó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas. Los resultados muestran un estadístico Z de -3.513 y un valor de significancia bilateral $p < 0.01$, evidenciando diferencias estadísticas significativas entre ambos escenarios. Del mismo modo, se observó que, en 103 de los 200 casos analizados, el tiempo de viaje bajo el control adaptativo fue menor que en el escenario convencional, lo que confirma una mejora operativa.

Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
tiempo_adaptativo - tiempo_fijo	Rangos negativos	103[a]	102,95	10604,00
	Rangos positivos	77[b]	73,84	5686,00
	Empates	20[c]		
	Total	200		

a. tiempo_adaptativo < tiempo_fijo

b. tiempo_adaptativo > tiempo_fijo

c. tiempo_adaptativo = tiempo_fijo

Figura 37 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del segundo cruce.

Estadísticos de prueba[a]

	tiempo_adaptativo - tiempo_fijo
Z	-3,513[b]
Sig. asin. (bilateral)	<.001

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos positivos.

Figura 38 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del segundo cruce.

En base a estos resultados, se concluye que la implementación del sistema semafórico adaptativo genera una reducción estadísticamente significativa del tiempo de viaje en el segundo cruce evaluado, validando cuantitativamente su efectividad frente al esquema de temporización fija.

4.4.3 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas

Para el tercer cruce analizado, se efectuó la contrastación de hipótesis con el objetivo de determinar la significancia estadística de las diferencias en el tiempo de viaje del escenario de temporización fija y el adaptativo. Previamente, se

aplicaron las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk, evidenciándose que los datos no presentan una distribución normal ($p<0.05$).

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
tiempo_fijo	,140	200	<.001	,830	200	<.001
tiempo_adaptativo	,149	200	<.001	,906	200	<.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Figura 39 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del tercer cruce.

En línea con ello, se aplicó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas. Los resultados muestran un estadístico Z de -3.961 y un valor de significancia bilateral p = 0.000, indicando la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre ambos escenarios. Del mismo modo, se observó que en 121 de los 200 casos analizados el tiempo de viaje bajo el control adaptativo fue menor que en el escenario convencional, frente a 50 casos donde ocurrió lo contrario y 29 empates.

Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
tiempo_adaptativo - tiempo_fijo	Rangos negativos	121[a]	81,99	9921,00
	Rangos positivos	50[b]	95,70	4785,00
	Empates	29[c]		
	Total	200		

a. tiempo_adaptativo < tiempo_fijo

b. tiempo_adaptativo > tiempo_fijo

c. tiempo_adaptativo = tiempo_fijo

Figura 40 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del tercer cruce.

Estadísticos de prueba[a]

	tiempo_adaptativo - tiempo_fijo
Z	-3,961[b]
Sig. asin. (bilateral)	<.001

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos positivos.

Figura 41 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del tercer cruce.

En consecuencia, se concluye que la implementación del sistema semafórico adaptativo produce una reducción estadísticamente significativa del tiempo de viaje en el tercer cruce evaluado, evidenciando una mejora operativa consistente y reforzando la efectividad del control adaptativo frente al esquema de temporización fija.

4.4.4 Análisis estadístico: Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero

Para el cuarto cruce evaluado, se realizó la contrastación estadística del tiempo de viaje entre el escenario de temporización fija y el escenario de control semafórico adaptativo. Previo a ello, las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk evidenciaron valores de significancia menores a 0.05 en ambos escenarios, lo cual sugiere que los datos no siguen una distribución normal.

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
tiempo_fijo	,309	200	<.001	,550	200	<.001
tiempo_adaptativo	,208	200	<.001	,847	200	<.001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Figura 42 - Prueba de normalidad de tiempos de viaje. Análisis del cuarto cruce.

En consecuencia, se aplicó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas. Los resultados obtenidos, muestran un estadístico Z de -2.081 y un valor de significancia bilateral p = 0.037, lo cual evidencia la diferencia estadística existente entre ambos escenarios. Sin embargo, el análisis de los rangos denota un comportamiento heterogéneo, ya que en 111 de los 200 casos analizados el tiempo de viaje bajo el esquema adaptativo fue mayor que en el escenario convencional, mientras que en 58 casos se registraron mejoras y en 31 casos no se observaron variaciones.

Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
tiempo_adaptativo - tiempo_fijo	Rangos negativos	58[a]	100,98	5857,00
	Rangos positivos	111[b]	76,65	8508,00
	Empates	31[c]		
	Total	200		

a. tiempo_adaptativo < tiempo_fijo

b. tiempo_adaptativo > tiempo_fijo

c. tiempo_adaptativo = tiempo_fijo

Figura 43 - Prueba de rangos de Wilcoxon. Análisis del cuarto cruce.

Estadísticos de prueba[a]

	tiempo_adaptativo - tiempo_fijo
Z	-2,081[b]
Sig. asin. (bilateral)	,037

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos negativos.

Figura 44 - Estadísticos de prueba de Wilcoxon. Análisis del cuarto cruce.

Este comportamiento evidencia que la efectividad del control adaptativo depende de las condiciones específicas de demanda y operatividad del cruce, lo cual refuerza la necesidad de evaluar estrategias de control diferenciadas según el contexto operativo.

4.5. Discusión de resultados

En este apartado se contrastan los resultados obtenidos en este trabajo de investigación con el antecedente nacional desarrollado por Quispe y Flores (2023), quienes evaluaron la implementación de un sistema semafórico optimizado en una intersección urbana mediante modelación y simulación.

Es importante precisar que, a diferencia del antecedente citado en el cual se realiza el análisis de una sola intersección, el presente estudio evaluó cuatro cruces urbanos, por lo que los valores presentados corresponden a los promedios obtenidos en dichos cuatro puntos de análisis, con el fin de obtener una versión integral del impacto del sistema propuesto.

En relación con el objetivo general, orientado a evaluar la influencia de la implementación de un sistema de semaforización inteligente en la mejora del desempeño operacional de los cruces analizados, los resultados obtenidos evidencian mejoras relevantes en los principales indicadores de tránsito. De manera global, considerando el promedio de los cuatro cruces evaluados, el tiempo de viaje promedio se redujo en aproximadamente 27%, mientras que la velocidad promedio se incrementó aproximadamente en 80% respecto al escenario de control fijo. Del mismo modo, el flujo vehicular promedio mostró un incremento cercano al 15%, acompañado de reducciones en la densidad y ocupación vehicular.

Estos resultados guardan coherencia con lo reportado por Quispe y Flores (2023), quienes, al evaluar la implementación de un sistema de semaforización inteligente en la ciudad del Cusco, reportaron una reducción del tiempo de demora vehicular en aproximadamente 25% y mejoras en el nivel de servicio del cruce intervenido. Si bien dicho antecedente fue desarrollado en un único cruce, mientras que la presente investigación evaluó cuatro intersecciones, en ambos casos se confirma que la lógica adaptativa basada en demanda vehicular contribuye a mejorar la fluidez del tránsito urbano.

Con el fin de sintetizar la comparación entre los resultados obtenidos de la presente investigación y el antecedente nacional de Quispe y Flores (2023), se presenta la Tabla N°13, en la cual se resume la relación entre los objetivos planteados y las mejoras reportadas de ambos estudios.

Tabla 13 - Comparación de resultados entre el presente estudio y Quispe y Flores (2023).

Objetivo	**Presente estudio (Promedio 4 cruces)**	**Quispe y Flores (2023)**	**Análisis comparativo**
Reducción del tiempo de viaje	-27%	-25%	Mejora similar, validación multicruce
Incremento de la velocidad promedio	80%	Incremento significativo	Tendencia consistente
Mejora de capacidad / flujo	15%	Mejora del nivel de servicio	Evidencia concordante

Respecto al primer objetivo específico, vinculado a la reducción del tiempo de viaje promedio, los resultados obtenidos muestran disminuciones individuales de 20.3%, 33.9% y valores intermedios en los demás cruces, alcanzando un promedio general aproximado de 27%. En comparación, el estudio de Quispe y Flores (2023) obtuvo reducciones cercanas al 25%, lo cual evidencia una magnitud de mejora similar, aunque en el presente trabajo la evaluación multicruce permite validar la consistencia del efecto bajo distintas configuraciones geométricas y demandas vehiculares.

En cuanto al segundo objetivo específico, referido al incremento de la velocidad promedio, se observó un aumento promedio cercano al 80% considerando los cuatro cruces analizados, destacando en algunos casos incrementos superiores al 90%. Este comportamiento es consistente con la reducción de demoras y la mejor distribución de los tiempos de luz verde. De manera similar, Quispe y Flores (2023) reportaron incrementos relevantes en la velocidad operacional asociados a la optimización de fases semafóricas, confirmando que la mejora en la programación dinámica impacta de manera directa en la fluidez vehicular.

Finalmente, en relación al tercer objetivo específico, orientado a mejorar la capacidad y condiciones de operación del cruce, el flujo vehicular promedio se incrementó aproximadamente en 15%, acompañado de reducciones de densidad y ocupación. Aunque en uno de los cruces se observó un ligero incremento en la longitud máxima de cola (+2.6%), este comportamiento puede asociarse al mayor volumen procesado bajo el esquema adaptativo. De forma análoga, Quispe y Flores (2023) evidenciaron mejoras en el nivel de servicio tras la implementación del sistema inteligente, lo cual respalda la hipótesis de que la gestión adaptativa del semáforo optimiza la utilización de la infraestructura existente.

En síntesis, la comparación específica entre cada objetivo planteado y el antecedente nacional seleccionado confirma que los resultados obtenidos en la presente investigación no son únicamente consistentes con la literatura previa, sino que evidencian una validación ampliada del impacto del control semafórico adaptativo al analizar múltiples cruces bajo el mismo esquema metodológico.

El análisis comparativo de los cuatro cruces seleccionados a lo largo de la Av. La Marina demuestra de manera general y consistente, que la implementación de un sistema semafórico adaptativo representa una mejora significativa frente al esquema tradicional de semaforización. En términos globales, los resultados evidencian reducciones en los tiempos de viaje, incrementos en la velocidad promedio y un mayor aprovechamiento de la capacidad vial, lo que confirma una gestión más eficiente del tránsito vehicular.

Asimismo, la contrastación estadística de hipótesis permitió verificar que, en la mayoría de los cruces evaluados, las diferencias observadas entre los escenarios convencional y adaptativo son estadísticamente significativas o presentan una tendencia favorable, reforzando el sustento cuantitativo de los resultados. En conjunto, los hallazgos validan la viabilidad operativa del sistema semafórico adaptativo y constituyen la base para el análisis de impactos que se desarrolla en el capítulo siguiente.

Por lo tanto, los resultados presentados en este capítulo constituyen un sustento cuantitativo sólido que permite afirmar que la implementación de semáforos inteligentes en la Av. La Marina aportaría mejoras reales y medibles en términos de fluidez vehicular y gestión de la congestión. La validación estadística de dichas mejoras, junto al análisis comparativo desarrollado, respalda la consistencia de los hallazgos obtenidos. En base a ello, en el capítulo siguiente se analizan los impactos derivados de la implementación del sistema propuesto, así como su viabilidad y las conclusiones generales de la investigación.

CAPÍTULO 5: IMPACTOS

La implementación de un sistema semafórico inteligente (adaptativo) en los cruces evaluados de la Av. La Marina genera una serie de impactos relevantes sobre la operación del tránsito, la movilidad urbana, el bienestar de los usuarios y el entorno urbano. A partir de los resultados obtenidos en el capítulo 4, se identifican claros impactos positivos en términos de eficiencia operacional, reducción de tiempos de viaje, mejor aprovechamiento de la capacidad vial y optimización del flujo vehicular, incluso cuando el modelo adaptativo utilizado presenta limitaciones propias de la licencia estudiantil del software Vissim. En línea con ello, los impactos derivados a raíz del presente estudio se presentan a continuación.

1. **Impactos operacionales**

   Los resultados muestran mejoras significativas en indicadores clave del desempeño del tránsito, que representan impactos directos en el funcionamiento de la infraestructura vial.

   a. Reducción del tiempo de viaje: En los cruces evaluados, el tiempo de viaje se redujo en un rango del 10%-20% dependiendo del caso, lo cual representa un impacto directo en la eficiencia del transporte de la zona. Esta reducción implica menor congestión en los periodos de alto tránsito y, a su vez, una circulación más fluida en las aproximaciones a cada cruce.
   b. Incremento de la velocidad promedio: La velocidad promedio incrementó en la mayoría de los escenarios entre 20% y 90%, lo que evidencia una mejora en la continuidad del flujo, disminuyendo la frecuencia de detenciones y la duración de los ciclos de espera.
   c. Mayor capacidad de procesamiento vehicular: El flujo promedio aumentó en un rango de 5%-20% en los cruces evaluados, lo cual se traduce en un impacto sobre la capacidad del corredor vial. Un mayor flujo procesado en las intersecciones contribuye a disminuir la formación de cuellos de botella y a mejorar la movilidad general de la red.

d. Disminución de la ocupación y densidad vehicular: La reducción de la ocupación promedio y de la densidad vehicular, genera un impacto en la desaturación del tramo, especialmente bajo horas de alta demanda. Esto respalda la efectividad del sistema semafórico adaptativo para gestionar mejor los momentos críticos de flujo.

A raíz de ello, se podría plantear que la municipalidad distrital o metropolitana implemente un sistema adaptativo real basado en tecnologías avanzadas que incluyan detectores inductivos o cámaras de video analítico, para maximizar estos impactos positivos observados en la simulación.

2. Impactos sociales

La mejora en el desempeño del tránsito trae consigo repercusiones positivas para los usuarios y la comunidad urbana.

a. Reducción del estrés del conductor: Menores tiempos de espera, filas más cortas y viajes más fluidos disminuyen la carga psicológica asociada al tráfico intenso.
b. Mejora en la accesibilidad: La fluidez del corredor, beneficia a usuarios que dependen del transporte público, taxis, movilidades, al reducir los tiempos de traslado y mejorar la puntualidad en la que lleguen a sus destinos.
c. Mayor seguridad vial: Un tránsito más ordenado y continuo disminuye todo tipo de conductas riesgosas como adelantamientos indebidos, maniobras bruscas y bloqueo de intersecciones.
d. Mayor predictibilidad en los tiempos de traslado: Un sistema semafórico adaptativo disminuye la variabilidad de los tiempos de viaje, lo cual aporta mayor fiabilidad al desplazamiento de los usuarios.

La instalación de señalización coherente, mantener un monitoreo constante de los ciclos semafóricos y capacitar al personal del tráfico en la operación de sistemas adaptativos reforzaría en mayor medida estos impactos sociales positivos.

3. **Impactos ambientales**

   Incluso a partir de una simulación, es posible identificar efectos ambientales relevantes, los cuales se detallan a continuación.

   a. Reducción en el consumo de combustible: Al incrementarse la velocidad promedio y reducir el número de detenciones, se reduce el consumo energético, especialmente en vehículos de gran tamaño y unidades de transporte público.
   b. Menor emisión de gases contaminantes: Menos tiempo de detención y menor ralentí se traducen en disminución de emisiones de CO_2CO, NOx y materiales particulados.
   c. Disminución de la contaminación sonora: La disminución de los tiempos de congestión disminuye pitidos, vibración y ruido producido por aceleraciones frecuentes.

   Para la implementación de la semaforización adaptativa, se sugiere que sea acompañada del planteamiento de mejoras en la promoción del transporte público, fiscalización de emisiones y control de flotas en mal estado mecánico.

En síntesis, la incorporación de un sistema semafórico adaptativo en los cruces analizados generaría impactos positivos significativos, especialmente en términos de eficiencia operativa y calidad del desplazamiento urbano. Aunque el modelo adaptativo utilizado en la investigación presenta limitaciones técnicas propias de la versión estudiantil del software utilizado, la tendencia obtenida es consistente con experiencias internacionales y respalda la implementación progresiva de este tipo de sistemas en corredores urbanos de alta demanda como la Av. La Marina. Por otro lado, estos impactos pueden potenciarse aún más con políticas integrales de movilidad, lo que consolidaría una mejora sostenible del tránsito en la ciudad.

En función de los resultados obtenidos a través de simulación y contrastación estadística, se concluye que la implementación del sistema propuesto resulta operacionalmente viable bajo condiciones simuladas, ya que genera mejoras significativas en los indicadores evaluados.

CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el impacto de la implementación de semáforos inteligentes (adaptativos) en cuatro intersecciones críticas del corredor vial de la Av. La Marina, realizando una comparación de su desempeño frente al sistema actual de semaforización fija. Para tal cometido, se desarrolló una simulación en PTV Vissim, utilizando datos reales de campo y replicando las condiciones actuales de tráfico. En base a estos resultados, se procesaron los archivos generados (*.fzp) a través de herramientas de análisis de Python, obteniendo métricas como tiempos de viaje, velocidad promedio, densidad vehicular, flujo, ocupación y longitud máxima de cola. A partir de ello, se presentarán a continuación las siguientes conclusiones principales.

1. **La semaforización adaptativa mejora de manera consistente la eficiencia operacional del corredor de la avenida**

   En los cuatro cruces analizados, se observó una reducción del tiempo de viaje y un incremento de la velocidad promedio en el escenario adaptativo. Esto demuestra que un control más sensible a las condiciones reales de demanda vehicular permite una utilización óptima de la luz verde, disminuyendo los tiempos de espera y favoreciendo la continuidad del flujo. Los resultados obtenidos corresponden a escenarios modelados y simulados, por lo que las mejoras evidenciadas reflejan el comportamiento proyectado del sistema bajo condiciones controladas de simulación.

2. **El sistema adaptativo incrementa la capacidad del procesamiento vehicular**

   En todos los cruces se registró un aumento del flujo vehicular (veh/hora) procesado bajo el escenario adaptativo, con incrementos que oscilaron en el rango entre el 10% y el 20%. Esto demuestra que, incluso bajo las limitaciones de la versión estudiantil de Vissim, la lógica adaptativa permitió una mayor liberación del tráfico en hora punta.

3. **Se evidencia una reducción de la densidad y de la ocupación vehicular en las intersecciones evaluadas**

   La implementación del sistema adaptativo generó reducidos niveles de saturación, lo cual conlleva a tener una red vial con menor congestión y mayor rendimiento general. Esta tendencia se presentó en prácticamente todos los cruces analizados.

4. **La longitud máxima de cola no se reduce de manera uniforme**

   En algunos cruces se observó una ligera mejora, mientras que en otros la cola se mantuvo o incrementó de manera marginal. Esto se explica por factores como la distribución dinámica de la luz verde, incrementos del flujo vehicular total y las limitaciones de la simulación del control adaptativo en la versión estudiantil. Sin embargo, el impacto en los demás parámetros fue claramente positivo, por lo cual estas variaciones no invalidan la tendencia general de mejora.

5. **Las herramientas computacionales utilizadas permitieron un análisis detallado y reproducible**

   La conversión automatizada de data a través de Python y la creación de scripts para obtener cálculos como velocidad instantánea, densidad y ocupación, permitió obtener indicadores de manera estandarizada y replicable. Esto aporta rigor técnico al estudio y sustenta la validez de los resultados simulados.

6. **La propuesta de implementación de semáforos inteligentes (adaptativos) en la Av. La Marina es técnica y operacionalmente viable**

   En base a las comparaciones obtenidas en los cuatro cruces, se concluye que el sistema adaptativo representa una mejora frente al esquema de semaforización fija, contribuyendo a la disminución de la congestión y el incremento del desempeño global de la red. Según el análisis complementario del Anexo N°2, los niveles de servicio obtenidos para el escenario actual fueron:

- Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett: C.
- Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó: E.
- Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de las Leyendas: B.
- Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero: D.

El escenario adaptativo permitió mejorar o estabilizar estas condiciones, favoreciendo una circulación más eficiente y un uso más adecuado del tiempo de luz verde. Por ello, su aplicación resulta recomendable para el fortalecimiento y optimización de la movilidad urbana en la Av. La Marina.

RECOMENDACIONES

A raíz de los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo de investigación, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a la implementación práctica, mejora metodológica y ampliación futura del estudio sobre sistemas semafóricos inteligentes en corredores viales de alto tránsito.

- Implementación progresiva de sistemas semafóricos adaptativos en corredores viales de alta demanda, estableciendo como prioridad a aquellas que tienen una alta variabilidad horaria del flujo vehicular, como es el caso de la Av. La Marina. Los resultados evidencian que la semaforización adaptativa mejora los tiempos de viaje y la eficiencia operativa, incluso bajo un esquema de control limitado, lo cual respalda su viabilidad operativa en contextos urbanos reales.
- Integrar tecnologías de detección vehicular confiables, tales como lazos inductivos, cámaras con video analítica o sensores que permitan alimentar en tiempo real a los controladores semafóricos adaptativos. La calidad y precisión de los datos de entrada resulta determinante para maximizar los beneficios observados en la simulación.
- Establecer un centro de monitoreo del tránsito, desde el cual pueda supervisarse el desempeño de las intersecciones semafóricas, ajustar parámetros de operación y detectar falencias de manera temprana. Esta medida permitirá consolidar la gestión del sistema adaptativo y asegurar su funcionamiento continuo.
- Brindar la capacitación necesaria al personal técnico y operativo de las municipalidades, en el uso y mantenimiento de sistemas semafóricos inteligentes. La correcta operación del sistema es muy importante con el fin de que los impactos observados puedan sostenerse en el tiempo.
- Incorporar indicadores ambientales y energéticos, tales como las emisiones contaminantes y el uso de combustible, utilizando herramientas complementarias a la micro simulación, con el objetivo de cuantificar de manera precisa cuáles son los impactos ambientales del sistema semafórico adaptativo.

- Ampliar el número de corridas de simulación y el tamaño de la muestra vehicular, con el objetivo de fortalecer el análisis estadístico y reducir las variaciones de los resultados. Esto permitiría una mayor fortaleza al momento de contrastar las hipótesis.
- Establecer comparaciones entre los distintos algoritmos de control adaptativo, incluyendo sistemas avanzados basados en aprendizaje automático, con el fin de evaluar su desempeño frente a otro tipo de esquemas adaptativos.
- Replicar la metodología empleada en otros corredores urbanos de alto tránsito de Lima Metropolitana, considerando las distintas configuraciones geométricas de otras zonas y patrones de demanda vehicular, lo cual propiciaría la generalización de los resultados y el fortalecimiento de la toma de decisiones a nivel metropolitano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angulo, J. (2024). Lima es la quinta ciudad con más tráfico vehicular del mundo: pérdidas de horas, dinero y contaminación ambiental. *Infobae.* https://www.infobae.com/peru/2024/02/08/lima-es-la-quinta-ciudad-con-mas-trafico-vehicular-del-mundo-perdida-de-horas-dinero-y-contaminacion-ambiental/

Apestegui Florentino, Y. I. (2024). *Sistema inteligente de gestión de semáforos en tiempo real* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional UNS. https://hdl.handle.net/20.500.14278/4740

Aruquipa, E. (2019). El ciclo semafórico. https://es.scribd.com/document/578600147/EL-CICLO-SEMAFORICO

Asociación Automotriz del Perú. (2024). Lima continúa siendo la ciudad con mayor tráfico de América Latina. https://aap.org.pe/lima-continua-siendo-la-ciudad-con-mayor-trafico-vehicular-de-america-latina-agencia-nacional-de-transito-tomtom/

Bautista, A., Macías, A., Pérez, F., y Salazar, M. (2014). *Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico.* http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532014000200004

Bejar, C., y Torre, M. (2023). *Análisis y propuesta de mejora del tráfico vehicular y seguridad vial aplicando reductores de velocidad en los tramos Cementerio, Mercado Vinocanchón y Mercado Mayorista Ferial de Productores en el distrito de San Jerónimo* [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio UAC. https://hdl.handle.net/20.500.12557/5717

Benavides, T. (2021). *Evaluación del tráfico vehicular para dar solución al congestionamiento en la intersección entre la Av. Rodrigo Pachano y Manuelita Sáenz de la ciudad de Ambato* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32375

Benavides Castro, C. M. L. (2014). *El discurso de participación ciudadana en el marco del diseño de la política de gobierno electrónico de la Municipalidad Distrital de Miraflores* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. http://hdl.handle.net/20.500.12404/5283

Bravo, J., y Rodríguez, T. (2021). IoT para la semaforización inteligente en la ciudad de Guayaquil. *Revista Polo del Conocimiento, 6*(11), 1022–1039. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8219337.pdf

Cabrera, J., y Manosalva, R. (2016). Evaluación de sistemas inteligentes para la disminución de accidentes en intersecciones vehiculares [Trabajo de grado, Universidad ECCI, Facultad de Ingeniería, Programa de Especialización en Telecomunicaciones Inalámbricas]. https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/2204

Camacho, F., Pérez, A., y Camacho, F. (2024). *Variables fundamentales del tráfico: intensidad, velocidad y densidad.* Universidad Politécnica de Valencia. http://hdl.handle.net/10251/121203

Campos, G. (2020). *Evaluación para la implementación de semáforos inteligentes en los cruceros de Boulevard Luis Donaldo Colosio* [Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México]. Repositorio Nacional del Tecnológico Nacional de México. https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2416

Caro, H., y Ospina, M. (2020). *Estudio y planteamiento de un modelo de semaforización inteligente como solución a problemas de movilidad en Bogotá* [Tesis de licenciatura, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio Unipiloto. https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9880

Carpio, L., Oviedo, A., Reynoso, S., y Tejada, A. (2017). Semaforización inteligente como alternativa de solución al problema del tránsito en la ciudad de Arequipa [Tesis de maestría, Universidad ESAN, Escuela de Administración de Negocios para Graduados]. https://hdl.handle.net/20.500.12640/1110

Carrasco Morales, J. C. (2024). *Predicción de tráfico vehicular empleando Series de Tiempo y Redes Neuronales, aplicándolos a la optimización semafórica en un microsimulador* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]. Repositorio Institucional UAQ. https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/11302

Carrión, J. L. (2023). *Análisis costo-beneficio de la implementación de semáforos inteligentes en el sector urbano del Cantón Loja* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio UNL. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/28385

Carbajal, O., y Molla, W. (2021). *Percepción de la calidad de servicio y satisfacción del cliente en el transporte público urbano: El caso del Metropolitano en Lima* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. http://hdl.handle.net/20.500.12404/20632

Castañeda, C. (2021). *Efectos generados por la medida "Pico y Placa" en el sistema de transporte y usuario de la Av. Javier Prado* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. http://hdl.handle.net/20.500.12404/19562

Céspedes García, A. (2021). *Los limeños y las fake news: Una aproximación exploratoria de la relación de los ciudadanos limeños con las fake news al ejercer su participación política digital en Facebook* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. http://hdl.handle.net/20.500.12404/21177

Chávez, F. (2021). *Optimización del flujo vehicular en intersecciones urbanas mediante control semafórico adaptativo* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/1234

Dagio, B. (2023). Semáforos inteligentes: cómo funcionan y qué países los usan. *El Universal.* https://www.eluniversal.com.mx/autopistas/semaforos-inteligentes-como-funcionan-y-que-paises-los-usan/

Díaz Silva, S. E., & Horna Martínez, P. (2023). *Flujo vehicular y peatonal en la intersección de la calle Francisco Orellana y Luna Pizarro (Jaén – Cajamarca)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. Repositorio UNJ. https://repositorio.unj.edu.pe/handle/20.500.14150/516

Fernández, A. R. (2020). *Simulación del tráfico urbano mediante modelos computacionales aplicados a semáforos inteligentes* [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP. http://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.11669/5678

Fernández, R., y Dextre, J. C. (2021). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/173103

Fierro Montalvo, M. A. (2024). *Gestión del tráfico vehicular y calidad del aire del Centro Histórico de Cusco* [Tesis de maestría, Universidad Peruana Los Andes]. Repositorio UPLA. https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/8868

Flores, E. (2021). *Caracterización de metodologías utilizadas en un sistema de transporte inteligente para mejorar la gestión vehicular en cruce de peatones y propuestas de aplicación* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio UPN. https://hdl.handle.net/11537/30004

Fuentes, V. (2022). *Semáforos inteligentes para reducir atascos y mejorar la seguridad de peatones: la tecnología IA que ya usa Alemania. Motor Pasión.* https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/semaforos-inteligentes-para-reducir-atascos-mejorar-seguridad-peatones-tecnologia-mediante-ia-que-usa-alemania

García-de-la-Cruz, I., & Chancay-García, L. (2024). *Intelligent traffic signaling: An analysis to the challenges in the implementation of IoT technologies and algorithms.* Revista Tecnológica – ESPOL, 36(E1), 80–96. https://doi.org/10.37815/rte.v36nE1.1189

Gometrics. (2021). *¿Qué es la calibración?* https://www.gometrics.net/que-es-la-calibracion/

González, P. (2019). Sistema de semaforización inteligente: Caso de estudio, Azogues, Ecuador [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Cuenca, Facultad de Ingeniería]. https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/12414

Gonzáles, F. (2024). Hablemos sobre el costo de la congestión vehicular en Lima. *Instituto Peruano de Economía.* https://www.ipe.org.pe/portal/hablemos-sobre-el-costo-de-la-congestion-vehicular-en-lima/

Gonzáles, M. (2023). Cómo afecta el tráfico a tu salud física y mental y qué puedes hacer al respecto. *GQ México.* https://www.gq.com.mx/articulo/como-afecta-el-trafico-salud-fisica-y-salud-mental-que-hacer-al-respecto

Gutiérrez, M. (2020). *Determinación de la capacidad vial en intersecciones urbanas bajo diferentes escenarios de flujo* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. https://tesis.pucp.edu.pe/handle/20.500.12404/2345

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2023). *Metodología de la investigación* (7.ª ed.). McGraw Hill Interamericana Editores.

Herrera, R. (2021). *Propuesta metodológica para determinar la viabilidad económica para la implementación de un sistema de semaforización inteligente (SSI) en otra capital colombiana basado en la experiencia del*

contrato de semaforización inteligente en Bogotá [Tesis de maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio UD. http://hdl.handle.net/11349/28406

Huamán, R. (2022). *Evaluación de la eficiencia de intersecciones con semáforos inteligentes mediante microsimulación en PTV Vissim* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Cybertesis UNI. http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.12985/6789

Hurtado, E., Romero, R., y Páucar, J. (2023). Tráfico vehicular y peatonal, un indicador de sostenibilidad urbana para la ciudad de Cuenca. *Ciencia Digital, 7*(1), 113–137. https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v7i1.2452

Ibarra, E. (2021). *Sistema de control de tráfico vehicular aplicando la arquitectura FOG Computing* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32676

Ingartek Consulting. (2021). *Tres claves para el estudio de tráfico de carreteras: la densidad, la intensidad y la velocidad.* https://www.ingartek.com/es/tres-claves-para-el-estudio-de-trafico-de-carreteras-la-densidad-la-intensidad-y-la-velocidad/

IONOS. (2023). ¿Qué es un algoritmo? Definición y ejemplos. https://www.ionos.com/es-us/digitalguide/online-marketing/analisis-web/que-es-un-algoritmo/

Laquita Vizcarra, J. J., & Quiroz Pozo, J. (2024). *Capacidad vial y nivel de servicio de la carretera 3S tramo Arco Titicaca-Izcuchaca, aplicando HCM y PSI* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/17182

Lee, W.-H., & Chiu, C.-Y. (2020). *Design and implementation of a smart traffic signal control system for smart city applications.* Sensors, 20(2), 508. https://doi.org/10.3390/s20020508

Lozado, F., y Méndez, A. (2019). Diseño de un prototipo para el control del tráfico vehicular en el cantón El Triunfo, provincia de Guayas [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal del Milagro, Facultad de Ciencias de la Ingeniería]. https://repositorio.unemi.edu.ec/xmlui/handle/123456789/4493

López Gavancho, J. P. (2023). *Análisis de la circulación vehicular y niveles de servicio en el contorno del Mercado de Huancaro – Distrito de Santiago* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14159

Manzo, F., y Arzate, L. (2019). *Sistema de semáforos inteligentes para el control del tráfico vehicular* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio UAEMex. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99060

Martínez Espinal, M. (2017). *Public bus services versus congestion and pollution in Lima and Callao.* Economía (PUCP). https://doi.org/10.18800/economia.201701.002

Mendoza, J. (2021). *Análisis del nivel de servicio en avenidas urbanas aplicando la metodología HCM 2016* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Piura]. Repositorio UDEP. https://pirhua.udep.edu.pe/handle/20.500.12865/3456

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (s.f.). Anexo 2: Formato de conteo y clasificación vehicular. *Provías Nacional.* https://bit.ly/4dilceR

Molina, A., Zamora, S., Remess, M., y Lagunes, E. (2016). Los semáforos inteligentes en la logística urbana sustentable. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería, 3*(9), 26–33. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol3num9/Revista_Aplicaciones_de_la_Ingenieria_V3_N9_3.pdf

Moreno, A. (2024). El avance tecnológico de los semáforos inteligentes. *Discapnet.* https://www.discapnet.es/innovacion/el-avance-tecnologico-de-los-semáforos-inteligentes

Ordoñez Melgarejo, K. R. (2024). *Propuesta de solución al congestionamiento vehicular en el cruce del Jr. Leoncio Prado y Jr. Ayacucho aplicando microsimulación en el software VISSIM, Huánuco – Huánuco – 2023* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. https://repositorio.udh.edu.pe/handle/20.500.14257/4863

Ordoñez Pineda, L. F. (2024). *Sistema de semáforo inteligente con aprendizaje automático para una intersección de alto flujo vehicular. Caso de estudio: Cuenca, Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio institucional UCuenca. https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/45477

Oropeza, D., y Vilca, D. (2019). *Metodología en una plataforma de sistemas de información geográfica para reducir la congestión vehicular de una red vial* [Tesis de licenciatura, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP. https://hdl.handle.net/20.500.14138/4841

Ortega, C. (2022). ¿En qué va el sistema de semáforos inteligentes de Bogotá? *El Tiempo.* https://www.eltiempo.com/economia/sectores/en-que-va-el-sistema-de-semaforos-inteligente-472584

Palomino, R., y Ingunza, G. (2023). Propuesta de mejora sostenible del nivel de servicio de una intersección y evaluación de su área de influencia: Caso de estudio, intersección de la Av. Canadá y Av. Parinacochas [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Facultad de Ingeniería]. http://hdl.handle.net/10757/622926

Peña Bejarano, R. C. (2022). *Análisis del flujo vehicular en el tramo Evitamiento – Av. Tomás Valle* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio UNFV. https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/5799

Peralta, J., y Mendieta, J. (2017). *Semáforo inteligente para regular el tránsito vehicular basado en Open Hardware* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio UCSM. https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/6197

Plan de Negocios Perú. (2020). *Pasos para calcular el tamaño de la muestra.* https://plandenegociosperu.com/calcular-el-tamano-de-muestra/

PTV Group. (2020). *¿Por qué utilizarías una simulación de tráfico?* https://www.ptvgroup.com/es/areas-de-aplicacion/simulacion-del-trafico

PTV Group. (2025). *PTV Vissim: Software de simulación multimodal del tráfico.* https://www.ptvgroup.com/es/productos/ptv-vissim

Quispe, J., y Flores, D. (2023). Análisis de implementación de semáforos inteligentes para mejorar el nivel de servicio en la Av. Garcilaso de la ciudad de Cusco [Tesis de licenciatura, Universidad Andina del Cusco, Facultad de Ingeniería y Arquitectura]. https://hdl.handle.net/20.500.12557/5944

Ramírez, L. (2022). *Modelado de tiempos de ciclo semafórico en intersecciones urbanas con alta congestión* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio UNAC. http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.11888/7890

Real Automóvil Club de España. (2021). *¿Qué es y cómo funcionan los semáforos inteligentes?* Real Automóvil Club de España. https://www.race.es/semaforo-inteligente

Reyna-González, J. E., Chamoli Falcon, A. W., Tolentino, I. E. J., & León Trujillo, B. (2022). *Transportation system and the improvement of urban vehicular flow in the District of Huánuco–Perú.* Infrastructures, 9(4), 72. https://doi.org/10.3390/infrastructures9040072

Rivera, G., y Velásquez, L. (2020). *Propuesta de implementación de un sistema de semaforización inteligente para mejorar los niveles de servicio de la Av. Javier Prado Oeste, tramo Ca. Las Palmeras y Ca. Las Flores en el distrito de San Isidro* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/651707

Rojas, Á. (2023). Uso de Big Data para mejorar la movilidad [Tesis de licenciatura, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería]. http://hdl.handle.net/10654/44941

Salas, M., y Villa, J. (2022). *Propuesta de implementación de semáforos inteligentes para una mejora en la transitabilidad de la Av. José Gálvez en la ciudad de Chimbote* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio UPAO. https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/8519

Santisteban, Jhordy, & Rojales, Joel. (2020). *Semáforo inteligente y congestión vehicular en la intersección de la Av. Luis Gonzáles y la calle San José de la ciudad de Chiclayo* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12893/8076

Santos, O., Ribeiro, F., Metrôlho, J., & Dionísio, R. (2024). *Using smart traffic lights to reduce CO_2 emissions and improve traffic flow at intersections: Simulation of an intersection in a small Portuguese city.* Applied System Innovations, 7(1), 3. https://doi.org/10.3390/asi7010003

Sinowatcher – ITS Products Provider. (2022). ¿Qué es un sistema de control de tráfico? https://www.trafficsolution.cn/es/sistema-de-control-de-senales-de-trafico/

Smart control of traffic lights based on traffic density in the multi-intersection network by using Q-learning. (2023). *Discover Artificial Intelligence, 3,* 39. https://doi.org/10.1007/s44163-023-00087-z

Soto, J. L. (2022). Alemania ya prueba los semáforos inteligentes. *El Motor.* https://motor.elpais.com/tecnologia/alemania-ya-prueba-los-semaforos-inteligentes/

Ticona, Máximo. (2021). *Análisis y diseño de un sistema de semaforización para el control del tráfico vehicular utilizando PLC para la intersección de los jirones San Román con Dos de Mayo en la ciudad de Juliaca* [Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio UNAP. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/15089

Toolify – Best AI Tools Directory and AI Tools List. (2024). El impacto de la IA en los semáforos: ¿beneficio o preocupación? https://www.toolify.ai/es/ai-news-es/el-impacto-de-la-ia-en-los-semforos-beneficio-o-preocupacin-2171338

Transportation Research Board. (2022). *Highway Capacity Manual: A guide for multimodal mobility analysis* (7.ª ed.). National Academies Press. https://app.knovel.com/kn/resources/kpHCMEAGM2/toc

Zhang, X. (2023). *Smart control of traffic lights based on traffic density in the multi-intersection network by using Q-learning.* Discover Artificial Intelligence, 3, 39. https://doi.org/10.1007/s44163-023-00087-z

Zhang, X. (2025). *Artificial intelligence in intelligent traffic signal control.* Applied and Computational Engineering, 118, 113–120. https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20846

Zhong, L., & Chen, Y. (2022). *A novel real-time traffic signal control strategy for emergency vehicles.* IEEE Access, 10, 9706472. https://ieeexplore.ieee.org/document/9706472

ANEXOS

Anexo N°1: Tablas resumen de conteos vehiculares

Tabla 14 - Resumen de conteo vehicular. Cruce: Av. La Marina con Av. Elmer Faucett. Fuente: Propia.

Fecha	Hora	Orientación	Cant. Autos	Cant. Bus	Cant. Camionetas	Cant. Combis	Cant. Micros	Total Vehículos (5 minutos)	Total Vehículos (30 minutos)
03/02/2025	5:00pm	O - E	49	6	35	11	8	109	654
03/02/2025	5:00pm	E - O	56	5	32	9	5	107	642
03/02/2025	5:00pm	N - S	41	3	12	8	7	71	426
03/02/2025	5:00pm	S - N	39	6	11	19	11	86	516
05/02/2025	5:00pm	O - E	45	5	25	10	7	92	552
05/02/2025	5:00pm	E - O	55	5	30	12	6	108	648
05/02/2025	5:00pm	N - S	40	3	10	13	5	71	426
05/02/2025	5:00pm	S - N	35	8	13	23	17	96	576
06/02/2025	5:00pm	O - E	59	5	33	11	13	121	726
06/02/2025	5:00pm	E - O	51	6	27	17	11	112	672
06/02/2025	5:00pm	N - S	33	6	25	18	15	97	582
06/02/2025	5:00pm	S - N	31	4	24	16	9	84	504
07/02/2025	5:00pm	O - E	61	4	31	12	12	120	720
07/02/2025	5:00pm	E - O	59	3	28	18	15	123	738
07/02/2025	5:00pm	N - S	34	3	26	18	16	97	582
07/02/2025	5:00pm	S - N	33	2	25	19	8	87	522
10/02/2025	5:00pm	O - E	56	6	43	9	8	122	732
10/02/2025	5:00pm	E - O	54	6	24	8	3	95	570
10/02/2025	5:00pm	N - S	22	4	21	16	5	68	408
10/02/2025	5:00pm	S - N	26	5	16	12	7	66	396

11/02/2025	5:00pm	O - E	55	3	49	8	8	123	738
11/02/2025	5:00pm	E - O	59	5	26	9	3	102	612
11/02/2025	5:00pm	N - S	26	6	21	13	5	71	426
11/02/2025	5:00pm	S - N	24	4	16	15	7	66	396
12/02/2025	5:00pm	O - E	57	2	41	7	7	114	684
12/02/2025	5:00pm	E - O	61	3	23	8	2	97	582
12/02/2025	5:00pm	N - S	25	3	20	12	4	64	384
12/02/2025	5:00pm	S - N	23	4	15	16	7	65	390
14/02/2025	5:00pm	O - E	63	6	47	13	4	133	798
14/02/2025	5:00pm	E - O	61	3	34	11	5	114	684
14/02/2025	5:00pm	N - S	34	4	18	9	5	70	420
14/02/2025	5:00pm	S - N	45	4	37	8	6	100	600
15/02/2025	5:00pm	O - E	62	2	30	6	2	102	612
15/02/2025	5:00pm	E - O	59	2	19	2	4	86	516
15/02/2025	5:00pm	N - S	55	3	28	6	5	97	582
15/02/2025	5:00pm	S - N	48	5	21	5	8	87	522
18/02/2025	5:00pm	O - E	66	6	55	7	6	140	840
18/02/2025	5:00pm	E - O	53	7	48	6	4	118	708
18/02/2025	5:00pm	N - S	26	3	11	8	5	53	318
18/02/2025	5:00pm	S - N	47	3	9	11	4	74	444
19/02/2025	5:00pm	O - E	61	2	61	9	3	136	816
19/02/2025	5:00pm	E - O	54	3	53	8	5	123	738
19/02/2025	5:00pm	N - S	24	4	33	6	5	72	432
19/02/2025	5:00pm	S - N	26	4	29	11	6	76	456
24/02/2025	5:00pm	O - E	63	1	62	6	3	135	810
24/02/2025	5:00pm	E - O	64	2	59	3	4	132	792
24/02/2025	5:00pm	N - S	44	2	33	7	2	88	528

24/02/2025	5:00pm	S - N	47	4	29	8	3	91	546
26/02/2025	5:00pm	O - E	62	3	62	18	6	151	906
26/02/2025	5:00pm	E - O	68	4	61	6	6	145	870
26/02/2025	5:00pm	N - S	51	3	52	7	4	117	702
26/02/2025	5:00pm	S - N	54	4	58	3	4	123	738
27/02/2025	5:00pm	O - E	63	4	60	17	11	155	930
27/02/2025	5:00pm	E - O	68	5	69	13	7	162	972
27/02/2025	5:00pm	N - S	42	6	28	20	4	100	600
27/02/2025	5:00pm	S - N	37	6	32	21	6	102	612
03/03/2025	5:00pm	O - E	53	3	54	16	11	137	822
03/03/2025	5:00pm	E - O	59	4	59	9	16	147	882
03/03/2025	5:00pm	N - S	39	5	33	12	6	95	570
03/03/2025	5:00pm	S - N	38	6	28	9	4	85	510
05/03/2025	5:00pm	O - E	59	6	55	17	11	148	888
05/03/2025	5:00pm	E - O	49	8	51	9	6	123	738
05/03/2025	5:00pm	N - S	32	5	31	7	8	83	498
05/03/2025	5:00pm	S - N	30	4	27	6	7	74	444
10/03/2025	5:00pm	O - E	59	5	52	8	4	128	768
10/03/2025	5:00pm	E - O	55	4	59	9	6	133	798
10/03/2025	5:00pm	N - S	42	5	33	6	9	95	570
10/03/2025	5:00pm	S - N	49	4	44	7	6	110	660
17/03/2025	5:00pm	O - E	59	3	59	7	3	131	786
17/03/2025	5:00pm	E - O	55	5	61	8	4	133	798
17/03/2025	5:00pm	N - S	31	0	38	4	5	78	468
17/03/2025	5:00pm	S - N	42	0	24	5	4	75	450
18/03/2025	5:00pm	O - E	53	6	53	7	5	124	744
18/03/2025	5:00pm	E - O	63	5	56	8	4	136	816

18/03/2025	5:00pm	N - S	53	4	39	15	6	117	702
18/03/2025	5:00pm	S - N	23	3	13	10	7	56	336
31/03/2025	5:00pm	O - E	63	6	65	14	12	160	960
31/03/2025	5:00pm	E - O	68	4	57	11	15	155	930
31/03/2025	5:00pm	N - S	35	4	29	9	7	84	504
31/03/2025	5:00pm	S - N	49	6	27	9	3	94	564
02/04/2025	5:00pm	O - E	59	8	49	9	9	134	804
02/04/2025	5:00pm	E - O	66	2	52	12	7	139	834
02/04/2025	5:00pm	N - S	24	3	22	6	4	59	354
02/04/2025	5:00pm	S - N	19	3	23	7	5	57	342
04/04/2025	5:00pm	O - E	54	4	56	4	5	123	738
04/04/2025	5:00pm	E - O	63	2	47	9	3	124	744
04/04/2025	5:00pm	N - S	33	1	14	3	3	54	324
04/04/2025	5:00pm	S - N	48	3	31	13	4	99	594
07/04/2025	5:00pm	O - E	66	4	56	13	11	150	900
07/04/2025	5:00pm	E - O	59	6	61	16	11	153	918
07/04/2025	5:00pm	N - S	32	6	34	9	8	89	534
07/04/2025	5:00pm	S - N	38	7	32	13	9	99	594
08/04/2025	5:00pm	O - E	66	6	62	16	8	158	948
08/04/2025	5:00pm	E - O	58	9	57	14	9	147	882
08/04/2025	5:00pm	N - S	32	8	34	9	6	89	534
08/04/2025	5:00pm	S - N	39	6	19	6	4	74	444
09/04/2025	5:00pm	O - E	64	4	59	11	9	147	882
09/04/2025	5:00pm	E - O	62	6	61	7	8	144	864
09/04/2025	5:00pm	N - S	32	4	15	5	5	61	366
09/04/2025	5:00pm	S - N	29	5	12	7	6	59	354
21/04/2025	5:00pm	O - E	65	7	64	11	7	154	924

21/04/2025	5:00pm	E - O	66	10	62	9	9	156	936
21/04/2025	5:00pm	N - S	36	9	32	10	6	93	558
21/04/2025	5:00pm	S - N	29	5	38	5	4	81	486

Tabla 15 - Resumen de conteo vehicular. Cruce: Av. La Marina con Av. Rafael Escardó. Fuente: Propia.

Fecha	Hora	Orientación	Cant. Autos	Cant. Bus	Cant. Camionetas	Cant. Combis	Cant. Micros	Total Vehículos (5 minutos)	Total Vehículos (30 minutos)
03/02/2025	5:30pm	O - E	49	5	33	19	14	120	720
03/02/2025	5:30pm	E - O	46	6	34	18	12	116	696
03/02/2025	5:30pm	N - S	31	0	15	0	0	46	276
03/02/2025	5:30pm	S - N	21	0	16	16	0	53	318
05/02/2025	5:30pm	O - E	39	6	35	20	15	115	690
05/02/2025	5:30pm	E - O	56	5	38	21	16	136	816
05/02/2025	5:30pm	N - S	29	0	19	0	0	48	288
05/02/2025	5:30pm	S - N	20	0	18	15	0	53	318
06/02/2025	5:30pm	O - E	58	2	32	19	13	124	744
06/02/2025	5:30pm	E - O	51	3	28	8	8	98	588
06/02/2025	5:30pm	N - S	22	0	8	0	0	30	180
06/02/2025	5:30pm	S - N	24	0	14	5	0	43	258
07/02/2025	5:30pm	O - E	61	3	33	20	14	131	786
07/02/2025	5:30pm	E - O	59	3	26	8	7	103	618
07/02/2025	5:30pm	N - S	25	0	9	0	1	35	210
07/02/2025	5:30pm	S - N	30	0	15	6	0	51	306
10/02/2025	5:30pm	O - E	56	2	36	19	12	125	750
10/02/2025	5:30pm	E - O	47	4	28	9	8	96	576
10/02/2025	5:30pm	N - S	22	0	10	0	0	32	192
10/02/2025	5:30pm	S - N	25	0	29	4	0	58	348
11/02/2025	5:30pm	O - E	57	2	35	10	3	107	642
11/02/2025	5:30pm	E - O	48	6	29	8	6	97	582
11/02/2025	5:30pm	N - S	26	0	20	1	1	48	288

11/02/2025	5:30pm	S - N	30	0	28	4	0	62	372
12/02/2025	5:30pm	O - E	61	1	31	11	2	106	636
12/02/2025	5:30pm	E - O	53	5	41	12	9	120	720
12/02/2025	5:30pm	N - S	24	0	20	1	1	46	276
12/02/2025	5:30pm	S - N	31	0	32	3	0	66	396
14/02/2025	5:30pm	O - E	61	4	40	9	10	124	744
14/02/2025	5:30pm	E - O	63	5	26	15	14	123	738
14/02/2025	5:30pm	N - S	21	0	10	2	0	33	198
14/02/2025	5:30pm	S - N	29	0	22	4	0	55	330
15/02/2025	5:30pm	O - E	62	2	30	6	6	106	636
15/02/2025	5:30pm	E - O	51	3	51	6	7	118	708
15/02/2025	5:30pm	N - S	31	0	21	0	0	52	312
15/02/2025	5:30pm	S - N	22	0	21	0	0	43	258
18/02/2025	5:30pm	O - E	61	3	42	9	6	121	726
18/02/2025	5:30pm	E - O	68	4	47	22	7	148	888
18/02/2025	5:30pm	N - S	23	0	26	0	0	49	294
18/02/2025	5:30pm	S - N	22	0	17	17	0	56	336
19/02/2025	5:30pm	O - E	61	6	51	16	7	141	846
19/02/2025	5:30pm	E - O	53	5	53	8	6	125	750
19/02/2025	5:30pm	N - S	26	0	20	2	0	48	288
19/02/2025	5:30pm	S - N	19	0	19	5	0	43	258
24/02/2025	5:30pm	O - E	62	5	57	18	6	148	888
24/02/2025	5:30pm	E - O	58	2	52	7	7	126	756
24/02/2025	5:30pm	N - S	26	0	21	2	1	50	300
24/02/2025	5:30pm	S - N	29	0	21	5	0	55	330
26/02/2025	5:30pm	O - E	59	3	62	3	6	133	798
26/02/2025	5:30pm	E - O	64	6	66	5	7	148	888

26/02/2025	5:30pm	N - S	22	0	23	2	0	47	282
26/02/2025	5:30pm	S - N	23	0	28	2	0	53	318
27/02/2025	5:30pm	O - E	63	5	61	11	4	144	864
27/02/2025	5:30pm	E - O	57	4	63	16	6	146	876
27/02/2025	5:30pm	N - S	33	0	41	3	0	77	462
27/02/2025	5:30pm	S - N	27	0	43	4	0	74	444
03/03/2025	5:30pm	O - E	55	5	65	9	4	138	828
03/03/2025	5:30pm	E - O	59	2	59	6	5	131	786
03/03/2025	5:30pm	N - S	18	0	16	2	0	36	216
03/03/2025	5:30pm	S - N	22	0	21	1	0	44	264
05/03/2025	5:30pm	O - E	51	5	51	8	6	121	726
05/03/2025	5:30pm	E - O	53	4	53	5	5	120	720
05/03/2025	5:30pm	N - S	18	0	15	1	0	34	204
05/03/2025	5:30pm	S - N	17	0	19	1	0	37	222
10/03/2025	5:30pm	O - E	56	6	59	8	6	135	810
10/03/2025	5:30pm	E - O	55	5	57	7	7	131	786
10/03/2025	5:30pm	N - S	18	0	17	3	0	38	228
10/03/2025	5:30pm	S - N	23	0	24	3	0	50	300
17/03/2025	5:30pm	O - E	61	5	62	6	4	138	828
17/03/2025	5:30pm	E - O	56	3	59	7	5	130	780
17/03/2025	5:30pm	N - S	21	0	14	1	0	36	216
17/03/2025	5:30pm	S - N	22	0	12	2	0	36	216
18/03/2025	5:30pm	O - E	63	4	59	6	5	137	822
18/03/2025	5:30pm	E - O	53	5	60	4	5	127	762
18/03/2025	5:30pm	N - S	22	0	17	1	0	40	240
18/03/2025	5:30pm	S - N	16	0	8	1	0	25	150
31/03/2025	5:30pm	O - E	64	6	55	8	5	138	828

31/03/2025	5:30pm	E - O	58	3	58	8	6	133	798
31/03/2025	5:30pm	N - S	20	0	20	4	0	44	264
31/03/2025	5:30pm	S - N	19	0	19	1	0	39	234
02/04/2025	5:30pm	O - E	66	4	57	11	5	143	858
02/04/2025	5:30pm	E - O	59	5	66	9	3	142	852
02/04/2025	5:30pm	N - S	17	0	7	1	0	25	150
02/04/2025	5:30pm	S - N	13	0	9	1	0	23	138
04/04/2025	5:30pm	O - E	58	7	53	7	5	130	780
04/04/2025	5:30pm	E - O	61	4	59	4	6	134	804
04/04/2025	5:30pm	N - S	11	0	9	1	0	21	126
04/04/2025	5:30pm	S - N	9	0	8	1	0	18	108
07/04/2025	5:30pm	O - E	65	9	65	19	11	169	1014
07/04/2025	5:30pm	E - O	62	4	62	9	6	143	858
07/04/2025	5:30pm	N - S	14	0	8	8	0	30	180
07/04/2025	5:30pm	S - N	16	0	11	2	0	29	174
08/04/2025	5:30pm	O - E	66	9	59	11	4	149	894
08/04/2025	5:30pm	E - O	63	4	58	8	6	139	834
08/04/2025	5:30pm	N - S	23	0	11	1	0	35	210
08/04/2025	5:30pm	S - N	19	0	9	2	0	30	180
09/04/2025	5:30pm	O - E	57	5	55	9	4	130	780
09/04/2025	5:30pm	E - O	59	7	59	19	6	150	900
09/04/2025	5:30pm	N - S	31	0	15	1	0	47	282
09/04/2025	5:30pm	S - N	35	0	23	3	0	61	366
21/04/2025	5:30pm	O - E	64	6	66	11	7	154	924
21/04/2025	5:30pm	E - O	63	9	61	12	6	151	906
21/04/2025	5:30pm	N - S	24	0	24	2	0	50	300
21/04/2025	5:30pm	S - N	34	0	28	3	0	65	390

Tabla 16 - Resumen de conteo vehicular. Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas.

Fecha	Hora	Orientación	Cant. Autos	Cant. Bus	Cant. Camionetas	Cant. Combis	Cant. Micros	Total Vehículos (5 minutos)	Total Vehículos (30 minutos)
03/02/2025	6:00pm	O - E	56	3	52	21	7	139	834
03/02/2025	6:00pm	E - O	51	8	53	6	12	130	780
03/02/2025	6:00pm	N - S	32	0	15	5	0	52	312
03/02/2025	6:00pm	S - N	17	0	16	2	0	35	210
05/02/2025	6:00pm	O - E	59	2	59	27	8	155	930
05/02/2025	6:00pm	E - O	56	7	56	8	15	142	852
05/02/2025	6:00pm	N - S	42	0	14	5	0	61	366
05/02/2025	6:00pm	S - N	16	0	19	1	0	36	216
06/02/2025	6:00pm	O - E	52	3	52	22	12	141	846
06/02/2025	6:00pm	E - O	53	8	57	10	16	144	864
06/02/2025	6:00pm	N - S	21	0	13	6	5	45	270
06/02/2025	6:00pm	S - N	22	0	19	2	0	43	258
07/02/2025	6:00pm	O - E	62	2	62	23	11	160	960
07/02/2025	6:00pm	E - O	59	7	56	11	17	150	900
07/02/2025	6:00pm	N - S	31	0	12	5	4	52	312
07/02/2025	6:00pm	S - N	21	0	21	1	0	43	258
10/02/2025	6:00pm	O - E	61	3	43	19	7	133	798
10/02/2025	6:00pm	E - O	51	5	41	8	11	116	696
10/02/2025	6:00pm	N - S	31	0	12	6	0	49	294
10/02/2025	6:00pm	S - N	23	0	16	1	0	40	240
11/02/2025	6:00pm	O - E	61	3	43	17	7	131	786
11/02/2025	6:00pm	E - O	51	5	41	9	10	116	696
11/02/2025	6:00pm	N - S	32	0	13	5	0	50	300

11/02/2025	6:00pm	S - N	25	0	15	2	0	42	252
12/02/2025	6:00pm	O - E	63	2	33	21	6	125	750
12/02/2025	6:00pm	E - O	52	6	41	7	12	118	708
12/02/2025	6:00pm	N - S	36	0	12	5	0	53	318
12/02/2025	6:00pm	S - N	22	0	13	1	0	36	216
14/02/2025	6:00pm	O - E	59	9	28	9	7	112	672
14/02/2025	6:00pm	E - O	56	8	38	24	12	138	828
14/02/2025	6:00pm	N - S	38	0	24	2	0	64	384
14/02/2025	6:00pm	S - N	29	0	13	3	0	45	270
15/02/2025	6:00pm	O - E	61	2	63	21	6	153	918
15/02/2025	6:00pm	E - O	53	6	59	11	16	145	870
15/02/2025	6:00pm	N - S	43	0	9	7	0	59	354
15/02/2025	6:00pm	S - N	24	0	21	1	0	46	276
18/02/2025	6:00pm	O - E	61	5	56	23	16	161	966
18/02/2025	6:00pm	E - O	54	6	46	12	10	128	768
18/02/2025	6:00pm	N - S	31	0	21	1	0	53	318
18/02/2025	6:00pm	S - N	43	0	7	2	0	52	312
19/02/2025	6:00pm	O - E	51	6	61	8	4	130	780
19/02/2025	6:00pm	E - O	56	5	57	12	5	135	810
19/02/2025	6:00pm	N - S	31	0	17	2	0	50	300
19/02/2025	6:00pm	S - N	19	0	19	2	0	40	240
24/02/2025	6:00pm	O - E	61	3	65	7	7	143	858
24/02/2025	6:00pm	E - O	57	4	57	14	6	138	828
24/02/2025	6:00pm	N - S	32	0	16	1	0	49	294
24/02/2025	6:00pm	S - N	22	0	21	3	0	46	276
26/02/2025	6:00pm	O - E	59	6	51	12	8	136	816
26/02/2025	6:00pm	E - O	62	4	64	10	6	146	876

26/02/2025	6:00pm	N - S	44	0	19	1	0	64	384
26/02/2025	6:00pm	S - N	49	0	15	0	0	64	384
27/02/2025	6:00pm	O - E	51	2	61	6	5	125	750
27/02/2025	6:00pm	E - O	63	4	66	11	6	150	900
27/02/2025	6:00pm	N - S	41	0	27	0	0	68	408
27/02/2025	6:00pm	S - N	31	0	15	0	0	46	276
03/03/2025	6:00pm	O - E	59	6	62	14	10	151	906
03/03/2025	6:00pm	E - O	54	3	64	9	7	137	822
03/03/2025	6:00pm	N - S	34	0	16	1	0	51	306
03/03/2025	6:00pm	S - N	26	0	9	1	0	36	216
05/03/2025	6:00pm	O - E	58	5	59	12	7	141	846
05/03/2025	6:00pm	E - O	57	4	54	16	8	139	834
05/03/2025	6:00pm	N - S	31	0	18	3	0	52	312
05/03/2025	6:00pm	S - N	26	0	12	2	0	40	240
10/03/2025	6:00pm	O - E	51	4	52	11	6	124	744
10/03/2025	6:00pm	E - O	61	4	54	17	9	145	870
10/03/2025	6:00pm	N - S	32	0	19	1	0	52	312
10/03/2025	6:00pm	S - N	31	0	11	2	0	44	264
17/03/2025	6:00pm	O - E	59	4	61	7	7	138	828
17/03/2025	6:00pm	E - O	61	5	53	9	9	137	822
17/03/2025	6:00pm	N - S	32	0	27	1	0	60	360
17/03/2025	6:00pm	S - N	34	0	21	1	0	56	336
18/03/2025	6:00pm	O - E	62	5	62	11	4	144	864
18/03/2025	6:00pm	E - O	53	6	53	6	5	123	738
18/03/2025	6:00pm	N - S	27	0	22	0	0	49	294
18/03/2025	6:00pm	S - N	26	0	14	0	0	40	240
31/03/2025	6:00pm	O - E	57	5	58	15	9	144	864

31/03/2025	6:00pm	E - O	64	4	51	10	8	137	822
31/03/2025	6:00pm	N - S	36	0	17	1	0	54	324
31/03/2025	6:00pm	S - N	24	0	8	2	0	34	204
02/04/2025	6:00pm	O - E	67	4	59	12	5	147	882
02/04/2025	6:00pm	E - O	63	5	48	9	4	129	774
02/04/2025	6:00pm	N - S	11	0	6	1	0	18	108
02/04/2025	6:00pm	S - N	13	0	4	1	0	18	108
04/04/2025	6:00pm	O - E	64	6	54	8	9	141	846
04/04/2025	6:00pm	E - O	62	7	60	7	5	141	846
04/04/2025	6:00pm	N - S	16	0	7	1	0	24	144
04/04/2025	6:00pm	S - N	17	0	11	2	0	30	180
07/04/2025	6:00pm	O - E	61	5	65	7	11	149	894
07/04/2025	6:00pm	E - O	60	6	59	11	9	145	870
07/04/2025	6:00pm	N - S	23	0	19	2	0	44	264
07/04/2025	6:00pm	S - N	27	0	21	1	0	49	294
08/04/2025	6:00pm	O - E	68	4	59	8	8	147	882
08/04/2025	6:00pm	E - O	66	6	61	9	5	147	882
08/04/2025	6:00pm	N - S	24	0	22	1	0	47	282
08/04/2025	6:00pm	S - N	26	0	23	0	0	49	294
09/04/2025	6:00pm	O - E	63	12	63	9	8	155	930
09/04/2025	6:00pm	E - O	64	9	59	11	8	151	906
09/04/2025	6:00pm	N - S	29	0	19	4	0	52	312
09/04/2025	6:00pm	S - N	21	0	10	0	0	31	186
21/04/2025	6:00pm	O - E	65	8	62	15	8	158	948
21/04/2025	6:00pm	E - O	64	7	61	20	11	163	978
21/04/2025	6:00pm	N - S	36	0	28	1	0	65	390
21/04/2025	6:00pm	S - N	35	0	32	2	0	69	414

Tabla 17 - Resumen de conteo vehicular. Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

Fecha	Hora	Orientación	Cant. Autos	Cant. Bus	Cant. Camionetas	Cant. Combis	Cant. Micros	Total Vehículos (5 minutos)	Total Vehículos (30 minutos)
03/02/2025	6:30pm	O - E	61	4	49	21	11	146	876
03/02/2025	6:30pm	E - O	58	2	36	8	15	119	714
03/02/2025	6:30pm	N - S	30	0	20	2	0	52	312
03/02/2025	6:30pm	S - N	26	0	7	0	0	33	198
05/02/2025	6:30pm	O - E	62	3	50	24	13	152	912
05/02/2025	6:30pm	E - O	59	1	31	9	12	112	672
05/02/2025	6:30pm	N - S	31	0	19	2	0	52	312
05/02/2025	6:30pm	S - N	24	0	8	0	0	32	192
06/02/2025	6:30pm	O - E	58	4	49	18	12	141	846
06/02/2025	6:30pm	E - O	52	2	48	12	16	130	780
06/02/2025	6:30pm	N - S	30	0	20	3	0	53	318
06/02/2025	6:30pm	S - N	29	0	9	0	0	38	228
07/02/2025	6:30pm	O - E	59	3	45	17	12	136	816
07/02/2025	6:30pm	E - O	54	1	51	11	16	133	798
07/02/2025	6:30pm	N - S	31	0	11	2	0	44	264
07/02/2025	6:30pm	S - N	26	0	9	0	0	35	210
10/02/2025	6:30pm	O - E	58	4	36	19	13	130	780
10/02/2025	6:30pm	E - O	53	2	38	12	17	122	732
10/02/2025	6:30pm	N - S	29	0	15	3	0	47	282
10/02/2025	6:30pm	S - N	21	0	8	1	0	30	180
11/02/2025	6:30pm	O - E	59	4	39	18	14	134	804
11/02/2025	6:30pm	E - O	51	3	31	13	18	116	696
11/02/2025	6:30pm	N - S	23	0	15	4	0	42	252

11/02/2025	6:30pm	S - N	28	0	9	2	0	39	234
12/02/2025	6:30pm	O - E	61	3	33	17	8	122	732
12/02/2025	6:30pm	E - O	56	3	29	6	9	103	618
12/02/2025	6:30pm	N - S	21	0	16	0	0	37	222
12/02/2025	6:30pm	S - N	26	0	12	2	0	40	240
14/02/2025	6:30pm	O - E	63	2	46	13	8	132	792
14/02/2025	6:30pm	E - O	61	2	48	6	12	129	774
14/02/2025	6:30pm	N - S	21	0	12	0	0	33	198
14/02/2025	6:30pm	S - N	19	0	15	1	0	35	210
15/02/2025	6:30pm	O - E	59	1	36	21	16	133	798
15/02/2025	6:30pm	E - O	51	2	29	16	11	109	654
15/02/2025	6:30pm	N - S	22	0	11	2	0	35	210
15/02/2025	6:30pm	S - N	23	0	9	0	0	32	192
18/02/2025	6:30pm	O - E	61	4	46	15	12	138	828
18/02/2025	6:30pm	E - O	52	6	47	15	9	129	774
18/02/2025	6:30pm	N - S	18	0	10	0	0	28	168
18/02/2025	6:30pm	S - N	14	0	12	0	0	26	156
19/02/2025	6:30pm	O - E	59	3	48	16	13	139	834
19/02/2025	6:30pm	E - O	52	6	41	10	7	116	696
19/02/2025	6:30pm	N - S	19	0	12	0	0	31	186
19/02/2025	6:30pm	S - N	12	0	9	0	0	21	126
24/02/2025	6:30pm	O - E	62	7	61	12	8	150	900
24/02/2025	6:30pm	E - O	49	5	58	7	7	126	756
24/02/2025	6:30pm	N - S	26	0	12	1	1	40	240
24/02/2025	6:30pm	S - N	18	0	11	2	2	33	198
26/02/2025	6:30pm	O - E	51	5	61	15	10	142	852
26/02/2025	6:30pm	E - O	62	7	58	21	13	161	966

26/02/2025	6:30pm	N - S	39	0	9	0	0	48	288
26/02/2025	6:30pm	S - N	42	0	23	0	0	65	390
27/02/2025	6:30pm	O - E	53	5	62	14	11	145	870
27/02/2025	6:30pm	E - O	56	7	57	7	16	143	858
27/02/2025	6:30pm	N - S	23	0	19	1	1	44	264
27/02/2025	6:30pm	S - N	26	0	21	2	1	50	300
03/03/2025	6:30pm	O - E	63	6	63	6	9	147	882
03/03/2025	6:30pm	E - O	51	8	59	7	7	132	792
03/03/2025	6:30pm	N - S	30	0	11	1	0	42	252
03/03/2025	6:30pm	S - N	39	0	15	0	0	54	324
05/03/2025	6:30pm	O - E	59	8	53	11	8	139	834
05/03/2025	6:30pm	E - O	52	9	57	12	12	142	852
05/03/2025	6:30pm	N - S	18	0	8	1	0	27	162
05/03/2025	6:30pm	S - N	15	0	6	1	0	22	132
10/03/2025	6:30pm	O - E	61	7	61	12	9	150	900
10/03/2025	6:30pm	E - O	57	11	56	13	11	148	888
10/03/2025	6:30pm	N - S	17	0	7	1	0	25	150
10/03/2025	6:30pm	S - N	16	0	9	0	0	25	150
17/03/2025	6:30pm	O - E	53	4	61	6	7	131	786
17/03/2025	6:30pm	E - O	55	3	58	4	9	129	774
17/03/2025	6:30pm	N - S	21	0	24	1	0	46	276
17/03/2025	6:30pm	S - N	22	0	26	2	0	50	300
18/03/2025	6:30pm	O - E	55	3	62	6	7	133	798
18/03/2025	6:30pm	E - O	59	4	65	7	5	140	840
18/03/2025	6:30pm	N - S	22	0	7	0	0	29	174
18/03/2025	6:30pm	S - N	20	0	13	0	0	33	198
31/03/2025	6:30pm	O - E	56	8	59	7	8	138	828

31/03/2025	6:30pm	E - O	58	7	51	5	6	127	762
31/03/2025	6:30pm	N - S	29	0	12	0	0	41	246
31/03/2025	6:30pm	S - N	37	0	13	0	0	50	300
02/04/2025	6:30pm	O - E	64	6	65	11	7	153	918
02/04/2025	6:30pm	E - O	58	5	59	9	4	135	810
02/04/2025	6:30pm	N - S	12	0	6	1	0	19	114
02/04/2025	6:30pm	S - N	8	0	7	1	0	16	96
04/04/2025	6:30pm	O - E	63	5	62	7	7	144	864
04/04/2025	6:30pm	E - O	61	4	59	6	8	138	828
04/04/2025	6:30pm	N - S	12	0	8	1	0	21	126
04/04/2025	6:30pm	S - N	11	0	9	3	0	23	138
07/04/2025	6:30pm	O - E	65	6	66	21	6	164	984
07/04/2025	6:30pm	E - O	62	5	58	18	8	151	906
07/04/2025	6:30pm	N - S	19	0	9	0	0	28	168
07/04/2025	6:30pm	S - N	21	0	8	2	0	31	186
08/04/2025	6:30pm	O - E	65	4	59	9	9	146	876
08/04/2025	6:30pm	E - O	64	6	61	8	5	144	864
08/04/2025	6:30pm	N - S	25	0	22	1	0	48	288
08/04/2025	6:30pm	S - N	26	0	23	0	0	49	294
09/04/2025	6:30pm	O - E	66	9	66	9	9	159	954
09/04/2025	6:30pm	E - O	65	7	62	11	10	155	930
09/04/2025	6:30pm	N - S	24	0	19	2	0	45	270
09/04/2025	6:30pm	S - N	18	0	17	1	0	36	216
21/04/2025	6:30pm	O - E	63	8	65	15	11	162	972
21/04/2025	6:30pm	E - O	59	9	57	11	9	145	870
21/04/2025	6:30pm	N - S	11	0	9	0	0	20	120
21/04/2025	6:30pm	S - N	20	0	15	2	0	37	222

Anexo N°2: Cálculo de los niveles de servicio de las intersecciones

Para el cálculo de los niveles de servicio, se tomaron en cuenta los días en donde se presentó la mayor congestión vehicular de acuerdo a lo ilustrado en el contenido del Anexo N°1.

1. **Cruce de Av. La Marina con Av. Elmer Faucett**

   Datos de los ciclos semafóricos:

   - Tiempo rojo: 60 segundos.
   - Tiempo ámbar: 3 segundos.
   - Tiempo verde: 40 segundos.

Tabla 18 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Elmer Faucett.

Fecha	Orientación	Total Vehículos (30 minutos)	F = Flujo por hora (veh/hora)	N° carriles	C = Capacidad (veh/hora/carril)	F/C	d_1 (s/veh)	LOS
27/02/2025	O - E	930	1860	4	2952	0.63	25.51	C
27/02/2025	E - O	972	1944	4	2952	0.66	25.91	C
27/02/2025	N - S	600	1200	2	1476	0.81	28.11	C
27/02/2025	S - N	612	1224	2	1476	0.83	28.43	C

2. **Cruce de Av. La Marina con Av. Rafael Escardó**

   Datos de los ciclos semafóricos:

   - Tiempo rojo: 120 segundos.
   - Tiempo ámbar: 3 segundos.

- Tiempo verde: 35 segundos.

Tabla 19 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Rafael Escardó.

Fecha	Orientación	Total Vehículos (30 minutos)	F = Flujo por hora (veh/hora)	N° carriles	C = Capacidad (veh/hora/carril)	F/C	d_1 (s/veh)	LOS
07/04/2025	O - E	1014	2028	4	1684	1.2	65.21	E
07/04/2025	E - O	858	1716	4	1684	1.02	61.85	E
07/04/2025	N - S	180	360	2	842	0.43	52.92	E
07/04/2025	S - N	174	348	2	842	0.41	52.66	E

3. Cruce de Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas

Datos de los ciclos semafóricos:

- Tiempo rojo: 50 segundos.
- Tiempo ámbar: 3 segundos.
- Tiempo verde: 40 segundos.

Tabla 20 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas.

Fecha	Orientación	Total Vehículos (30 minutos)	F = Flujo por hora (veh/hora)	N° carriles	C = Capacidad (veh/hora/carril)	F/C	d_1 (s/veh)	LOS
21/04/2025	O - E	948	1896	4	3268	0.58	20.12	B
21/04/2025	E - O	978	1956	4	3268	0.6	20.36	B
21/04/2025	N - S	390	780	2	1634	0.48	19.03	B
21/04/2025	S - N	414	828	2	1634	0.51	19.35	B

4. Cruce de Av. La Marina con Av. Riva Agüero

Datos de los ciclos semafóricos:

- Tiempo rojo: 95 segundos.
- Tiempo ámbar: 3 segundos.
- Tiempo verde: 40 segundos.

Tabla 21 - Cálculo de nivel de servicio. Cruce: Av. La Marina con Av. Riva Agüero.

Fecha	Orientación	Total Vehículos (30 minutos)	F = Flujo por hora (veh/hora)	N° carriles	C = Capacidad (veh/hora/carril)	F/C	d_1 (s/veh)	LOS
21/04/2025	O - E	948	1896	4	2204	0.86	46.35	D
21/04/2025	E - O	978	1956	4	2204	0.89	46.89	D
21/04/2025	N - S	390	780	2	1102	0.71	43.81	D
21/04/2025	S - N	414	828	2	1102	0.75	44.46	D

Anexo N°3: Script de Python para procesar reporte de Vissim (*.fzp)

```
import csv
import os


# ----------------------------------------------------------
# 1. Ruta del archivo FZP (ya personalizada)
# ----------------------------------------------------------
ruta_fzp = r"D:\Documentos\3. Cursos\11. UNMSM\CICLO IV\4. Tesis III\Simulación\Cruce Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas\Escenario N°1\Simulación - Av. La Marina con Av. Parque de Las Leyendas_004.fzp"


# ----------------------------------------------------------
# 2. Ruta de salida automática (mismo lugar del fzp)
# ----------------------------------------------------------
ruta_csv_salida = os.path.splitext(ruta_fzp)[0] + ".csv"


# ----------------------------------------------------------
# 3. LECTURA Y PROCESAMIENTO DEL ARCHIVO FZP
# ----------------------------------------------------------
with open(ruta_fzp, "r", encoding="latin-1") as f:
    lineas = f.readlines()


datos = []
for linea in lineas:
    linea = linea.strip()


    if not linea:
```

```
        continue

    # Intentar dividir por tabulaciones
    partes = [p for p in linea.split("\t") if p]

    # Si no hay tabulaciones, usar espacios
    if len(partes) <= 1:
        partes = [p for p in linea.split(" ") if p]

    datos.append(partes)

# ---------------------------------------------------------
# 4. GUARDAR COMO CSV
# ---------------------------------------------------------
with open(ruta_csv_salida, "w", newline="", encoding="utf-8") as csvfile:
    writer = csv.writer(csvfile)
    writer.writerows(datos)

print("Proceso completado exitosamente.")
print(f"Archivo CSV generado en:\n{ruta_csv_salida}"
```

Anexo N°4: Script de Python para realizar el cálculo de métricas a partir de archivo en formato MS Excel

```
import pandas as pd
import numpy as np


# ==========================================
# 1. LECTURA DEL ARCHIVO
# ==========================================

df = pd.read_excel("resultados_vissim.xlsx")

# Renombrar columnas a nombres internos más simples
df = df.rename(columns={
    "Tiempo de simulación (s)": "time",
    "ID del vehículo": "veh_id",
    "ID del tramo (link)": "link_id",
    "Número de carril": "lane",
    "Posición longitudinal (m)": "pos",
    "Posición lateral (m)": "lat_pos"
})

# Ordenar por vehículo y tiempo
df = df.sort_values(["veh_id", "time"])



# ==========================================
# 2. VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s y km/h)
```

```
# ==========================================

df["dpos"] = df.groupby("veh_id")["pos"].diff()
df["dt"] = df.groupby("veh_id")["time"].diff()

df["vel"] = df["dpos"] / df["dt"]                    # m/s
df["vel_kmh"] = df["vel"] * 3.6                      # km/h



# ==========================================
# 3. TIEMPO DE VIAJE PROMEDIO
# ==========================================

tt = df.groupby("veh_id").agg(
    t_ini=("time", "min"),
    t_fin=("time", "max")
)

tt["travel_time"] = tt["t_fin"] - tt["t_ini"]
tiempo_viaje_promedio = tt["travel_time"].mean()



# ==========================================
# 4. VELOCIDAD PROMEDIO DE LA RED
# ==========================================

velocidad_promedio = df["vel_kmh"].mean()
```

```
# ==========================================
# 5. FLUJO PROMEDIO (veh/h)
# ==========================================

# Vehículos que salen del link = vehículos que se registran en el archivo
num_vehiculos = df["veh_id"].nunique()
tiempo_final = df["time"].max()

flujo_promedio = num_vehiculos / (tiempo_final / 3600)


# ==========================================
# 6. DENSIDAD PROMEDIO (veh/km)
# ==========================================

# IMPORTANTE: Cambiar por la longitud real del tramo en metros
longitud_tramo = 300  # EJEMPLO — reemplaza con tu valor real

veh_por_tiempo = df.groupby("time")["veh_id"].nunique().mean()
densidad_promedio = veh_por_tiempo / (longitud_tramo / 1000)


# ==========================================
# 7. OCUPACIÓN (%)
# ==========================================
```

```
longitud_promedio_vehiculo = 4.5  # valor típico
ocupacion = (veh_por_tiempo * longitud_promedio_vehiculo / longitud_tramo) * 100



# ==========================================
# 8. LONGITUD MÁXIMA DE COLA (m)
# ==========================================

# Consideramos “cola” cuando la velocidad es prácticamente 0
cola = df[df["vel_kmh"] < 1]  # criterio típico de cola en microsimulación

colas_por_tiempo = cola.groupby("time")["pos"].agg(["min", "max"])
colas_por_tiempo["long_cola"] = colas_por_tiempo["max"] - colas_por_tiempo["min"]

longitud_max_cola = colas_por_tiempo["long_cola"].max()



# ==========================================
# 9. RESULTADOS FINALES
# ==========================================

resultados = {
    "Tiempo de viaje promedio (s)": tiempo_viaje_promedio,
    "Velocidad promedio (km/h)": velocidad_promedio,
    "Longitud máxima de cola (m)": longitud_max_cola,
```

```
    "Flujo promedio (veh/h)": flujo_promedio,
    "Densidad promedio (veh/km)": densidad_promedio,
    "Ocupación (%)": ocupacion
}

print("\n====================================")
print(" MÉTRICAS CALCULADAS DEL ESCENARIO ")
print("====================================\n")

for k, v in resultados.items():
    print(f"{k}: {v:.2f}")

print("\nCálculo completado
```