UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**“Optimización del Comportamiento Operacional de una Intersección Tipo
Trébol aplicando Semaforización Inteligente con la Metodología Ramp
Metering”**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Cutipa Luque, John Peter (0000-0002-4031-7147)

Lozano Laffore, Edson (0000-0002-3292-4756)

ASESOR

Campos de la Cruz, Fernando José (0000-0002-7827-2861)

Lima, 10 de diciembre de 2020

DEDICATORIA

A mis padres, Celestino y Elsa, por su paciencia y apoyo incondicional durante todo este proceso, por confiar en mí y estar conmigo durante todo este tiempo.

John Cutipa Luque.

A todas aquellas personas que se esfuerzan y no se dan por vencidas frente a la adversidad.

Edson Lozano Laffore.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Celestino y Elsa, por su paciencia y apoyo incondicional durante todo este proceso, por confiar en mí y estar conmigo durante todo este tiempo, gracias.

John Cutipa Luque.

A mi familia, amigos, compañeros y todos los que me apoyaron a culminar esta etapa de mi vida. Muchas gracias.

Edson Lozano Laffore.

RESUMEN

Los tréboles son infraestructuras diseñadas para mejorar la circulación y seguridad vehicular en las intersecciones. El trébol analizado se define como una intersección vial a desnivel parcial de tres lazos y cuatro ramales directos; el cual, está comprendido por la vía expresa metropolitana Javier Prado y la vía expresa nacional Panamericana. Esta investigación se realizó mediante un análisis de riesgo donde se obtuvo un nivel de riesgo intolerable identificado en los conductores que invaden las vías adyacentes; los cuales, interrumpen el flujo vehicular y pueden ocasionar colisiones. Además, se identificó problemas en su comportamiento operacional, especialmente en los lazos que confluyen con las vías principales. Esto debido al ingreso desordenado de vehículos, inadecuada dosificación vehicular y maniobras peligrosas realizadas por los conductores que tratan de ingresar a la vía principal. La presente investigación propone un sistema de semaforización inteligente con la metodología Ramp metering en base al algoritmo ALINEA. El cual, ordena, mediante una dosificación vehicular en tiempo real, el ingreso de los vehículos hacia las vías principales. Además, disminuye la probabilidad de colisiones ya que aplica un control de ingreso adaptativo. La propuesta logra que la velocidad promedio se incremente en 15,8% y que los tiempos de viaje se reduzcan en un máximo de 19.1%. Adicionalmente, existe un leve incremento de 30 Veh/h en el aforo vehicular del trébol. A partir de lo observado, se demuestra que la optimización de parámetros individuales genera una sinergia que influye positivamente en el comportamiento operacional del trébol.

Palabras clave: Análisis de riesgos; Semáforos inteligentes; Ramp metering; Alinea; Trébol.

“Optimization of the Operational Behavior of a Cloverleaf Applying Smart Traffic Lights with the Ramp Metering Methodology”

ABSTRACT

Clovers are infrastructures designed to improve traffic and vehicular safety at intersections. The analyzed cloverleaf is a partially uneven road intersection with three loops and four direct branches located in the Javier Prado highway and the Panamericana highway in the city of Lima. The research will base on a risk analysis with an intolerable level of risk identified in drivers who invaded adjacent roads. Interrupt the flow of vehicles and can cause chain collisions. Also, it was possible to identify problems in their operational behavior, especially in the loops that converge with the main roads. Due to the disorderly entry of vehicles, inadequate vehicle dosing, the formation of lines in cloverleaf loops, increased probability of collisions and dangerous maneuvers carried out by drivers trying to enter the main road. The present research proposes an intelligent traffic light system with the Ramp metering methodology based on the ALINEA algorithm. Which, through real-time vehicle dosing, orders the entry of vehicles onto the main roads. Besides, it reduces the probability of collisions since it applies adaptive entry control. The research achieves an increased by 15.8% in the average speed, and a maximum of 19.1% reduces that travel times. Additionally, there is a slight increase of 30 Veh / h in clover's vehicle capacity. Furthermore, it shows that the optimization of individual parameters generates a synergy that positively influences the operational behavior of the clover.

Keywords: Smart traffic lights; Ramp Metering; ALINEA; Cloverleaf.

TABLA DE CONTENIDOS

1	CAPITULO I: GENERALIDADES	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	REALIDAD PROBLEMÁTICA.	1
1.3	FUNDAMENTACIÓN.....	2
1.3.1	Formulación del Problema.	2
1.3.2	Hipótesis.	2
1.4	OBJETIVOS.	3
1.4.1	Objetivo General.	3
1.4.2	Objetivos Específicos.....	3
1.5	DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO.....	3
2	CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1	VÍAS URBANAS.	5
2.1.1	Clasificación de Vías urbanas.....	5
2.2	TIPOS DE VEHÍCULOS.....	5
2.3	ANÁLISIS DE RIESGOS	6
2.4	MODELO Y SISTEMA.	7
2.5	INTERSECCIÓN VEHICULAR.....	7
2.6	INTERSECCIONES A NIVEL.....	8
2.6.1	Tipos de intersecciones a nivel.....	8
2.7	INTERSECCIONES A DESNIVEL	9
2.7.1	Clasificación y tipos de intersecciones a nivel	10
2.7.2	Intercambios de tres lazos.....	11
2.7.3	Intercambios de cuatro lazos	12
2.8	TRÉBOL.	13
2.8.1	Lazos o ramales.....	14
2.8.2	Trébol Completo	14
2.8.3	Trébol Parcial	15
2.9	CONFLUENCIAS Y BIFURCACIONES	16
2.10	SISTEMAS DE SEMAFORIZACIÓN.....	17
2.10.1	Clasificación de los Sistemas de Semaforización	18

2.11	SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE	19
2.18	RAMP METERING.....	20
2.18.1	Componentes de Ramp Metering.....	21
2.18.2	Detectores	22
2.18.3	Semaforización.....	23
2.19	OPERACIONES APLICADAS EN RAMP METERING	25
2.19.1	Tipos de Operación.....	25
2.20	ENFOQUES UTILIZADOS EN RAMP METERING	26
2.20.1	Tipos de Enfoques.....	26
2.21	ALGORITMO ALINEA	28
2.22	VisVAP	30
2.23	MICROSIMULACIÓN DEL TRÁFICO.	30
2.24	VISSIM	31
2.24.1	Aplicaciones de VISSIM.	31
2.25	PARÁMETROS MICROSCÓPICOS.....	32
2.26	VARIABLES RELACIONADAS CON EL FLUJO VEHICULAR.	33
2.27	MODELO DE SEGUIMIENTO VEHICULAR – WIEDEMANN.....	33
2.28	MICROSIMULACIÓN EN VISSIM.....	36
2.28.1	Nivel de aleatoriedad.....	36
2.28.2	Número de Semillas.....	36
2.28.3	Calibración del Modelo.....	36
2.28.4	Validación de Datos.....	37
3	CAPITULO III: METODOLOGÍA	39
4	CAPITULO IV: ANALISIS DEL CASO DE ESTUDIO	44
4.1	ÁREA DE ESTUDIO DEL CASO	44
4.2	ANÁLISIS DE RIESGOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO	45
5	CAPITULO V: MICROSIMULACIÓN DEL TRÉBOL	51
5.1	MODELO VEHICULAR (VISSIM)	51
5.1.1	Importación a escala de la intersección (Vissim).....	51
5.1.2	Criterios de diseño geométrico de la propuesta en la zona de estudio.....	52
5.1.3	Creación de vías y conectores	52
5.1.4	Flujo vehicular total	53

5.1.5	Composición vehicular	54
5.1.6	Velocidad deseada	55
5.1.7	Definición de rutas vehiculares:	57
5.1.8	Solución áreas de conflicto.....	58
5.1.9	Creación de señales de control	60
5.2	CALIBRACIÓN DEL MODELO VEHICULAR	61
5.2.1	Parámetros de Eficiencia vehicular	61
5.2.2	Parámetros de simulación vehicular.....	61
5.2.3	Resultados de los vehículos	62
5.2.4	Parámetros del comportamiento del conductor	63
5.2.5	Evaluación del número de corridas	64
5.2.6	Comprobación de la calibración de vehículos mediante la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias.....	65
5.3	VALIDACIÓN DEL MODELO VEHICULAR	68
5.3.1	Comprobación de la validación de vehículos mediante la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias.....	70
6	CAPITULO VI: RESULTADOS Y PROPUESTA SEMAFÓRICA.....	74
7	CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
7.1	CONCLUSIONES	82
7.2	RECOMENDACIONES	85
8	[REFERENCIAS].....	86
7.	[ANEXOS].....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de detectores en la metodología Ramp metering.....	23
Tabla 2. Resultados del análisis de riesgo para el primer caso.....	46
Tabla 3. Resultados del análisis de riesgo para el segundo caso.	47
Tabla 4. <i>Resultados del análisis de riesgo para el tercer caso.</i>	48
Tabla 6. Distribución de velocidades en la vía expresa Javier Prado Oeste a Este.	56
Tabla 7. Se muestra la velocidad en Km/h y las frecuencias relativas acumuladas.	56
Tabla 8. Valores de los parámetros de Wiedemann 74, y media de los tiempos de viaje del trébol.....	63
Tabla 9. Número de corridas en la Av. Javier Prado Este- Oeste. Fuente: Elaboración propia.	64
Tabla 10. Número de corridas en la Av. Javier Prado Oeste- Este. Fuente: Elaboración propia.	64
Tabla 11. Número de corridas en la Av. Panamericana Sur- Norte. Fuente: Elaboración propia.	65
Tabla 12. Número de corridas en la Av. Panamericana Norte- Sur. Fuente: Elaboración propia.	65
Tabla 13. Número de corridas en la Av. Javier Prado Este- Oeste. (validación).	69
Tabla 14. Número de corridas en la Av. Javier Prado Oeste- Este. (validación).	69
Tabla 15. Número de corridas en la Av. Panamericana Sur- Norte. (validación).	69
Tabla 16. Número de corridas en la Av. Panamericana Norte- Sur. (validación).	69
Tabla 17. Parámetros de los Controladores de Los Semáforos.	78
Tabla 18. Tiempos de Viaje en la Confluencia de Los Lazos.	79
Tabla 19. Porcentaje de Mejora en Tiempos de Viaje.....	79
Tabla 20. Porcentajes de Mejora en las Velocidades Promedio.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Datos básicos de los vehículos utilizados para el dimensionamiento de carreteras. Según Reglamento Nacional de Vehículos (D.S. N° 058-2003-MTC). Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.	6
Figura 2. Tipos de Intersección a nivel. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2018....	8
Figura 3. Variedad de tipos de intersección a nivel. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018”, por MTC, 2018.	9
Figura 4. Tipos de intersecciones a desnivel. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.....	11
Figura 5. Intercambio de tres ramas. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.....	12
Figura 6. Tipos característicos de intercambios de cuatro ramas (diamante y trébol). Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018...	13
Figura 7. Partes y estructura base de un trébol. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2018..	14
Figura 8. Intercambio tipo trébol completo. Adaptado de A policy of Geometric Design of Highways and Streets 2018”, por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018.....	15
Figura 9. Configuraciones parciales de las rampas del trébol, giros y salidas. Adaptado de “A policy of Geometric Design of Highways and Streets 2018”, por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018.	16
Figura 10. Confluencias y bifurcaciones. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.....	17
Figura 11. Diagrama de clasificación de los sistemas de semaforización. Adaptado de “SISTEMA AUTÓNOMO DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR PARA INTERSECCIONES DE AVENIDAS”, por Arce, 2017.	19
Figura 12. Configuración de Ramp Metering. Adaptado de “Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy—A Primer”. por Mizuta, Roberts, Jacobsen, & Thompson, 2014.....	21
Figura 13. Estrategia ALINEA. Adaptado de “Local Ramp Metering Strategy ALINEA: Microscopic Simulation Based Evaluation Study on Istanbul Freeways”, por Abuamer, & Celikoglu, 2017.	29

Figura 14. Relaciones de tiempo y espacio entre vehículos. Adaptado de “Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones”, por Reyes, Espíndola & Cárdenas, 2007.....	32
Figura 15. Lógica de seguimiento vehicular (Wiedemann 1974). Adaptado de VISSIM 5.40 - Manual del usuario, por PTV Planung Transport Verkehr AG, 2012.	34
Figura 16. Esquematización de los procesos de calibración y validación de modelos. Adaptado de “Simulación Microscópica del Tránsito”. por Montenegro & Lozano, 2013.	38
Figura 17. Metodología para la elaboración del modelo microscópico del proyecto. Adaptado de “TAT Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019 Update to the 2004 Version”, por Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2017.	39
Figura 18. Drone utilizado modelo Mavic Pro. Fuente: Elaboración Propia.	40
Figura 19. Distanciómetro láser digital Bosch. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 20. Flujograma del trébol. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 21. Diagrama estrategia ALINEA aplicado en un intercambio a desnivel tipo trébol. Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 22. Área de estudio del caso. Fuente: Elaboración Propia.	44
Figura 23. Congestión Vehicular Lima, por TomTom (2019).	44
Figura 24. Vehículos del lazo ingresando a la vía principal. Fuente: Elaboración propia. .	45
Figura 25. Desorden provocado por el ingreso desordenado de los vehículos. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 26. Alta demanda vehicular sin control semafórico identificada en las vías que componen el trébol. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 27. Ausencia de dosificación vehicular generando una ralentización general. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 28. Ingreso intempestivo de un vehículo a una de las vías principales. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 29. Importación y escala de la imagen al VISSIM. Fuente: Elaboración Propia.....	52
Figura 30. Vía principal, lazo y conector. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 31. Ruta de ingreso del flujo vehicular. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 32. Cantidad de vehículos en las vías. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 33. Flujos relativos en el sentido panamericana Norte a Sur. Fuente: Elaboración propia.	55

Figura 34. Flujos relativos en el sentido panamericana Sur a Norte. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 35. Flujos relativos en el sentido Javier prado Este a Oeste. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 36. Flujos relativos en el sentido Javier prado Oeste a Este. Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 37. Distribución de la velocidad deseada en la dirección Javier Prado Oeste a Este. Elaboración propia.....	57
Figura 38. Flujo relativo en la Av. Panamericana Sur a Norte. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 39. Vista espacial de la distribución del flujo relativo en la Av. Panamericana Sur a Norte. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 40. Área de conflicto con un estado activo y un estado pasivo, debido a la situación observada. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 41. Reglas de prioridad de un lazo ingresando a la vía principal. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 42. Creación de señalización semafórica. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 43. Parámetros de simulación. Fuente: Elaboración propia.....	62
Figura 44. Se establece el tiempo de estabilización (warm up) y el intervalo de tiempo a simular. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 45. Parámetros de comportamiento de los conductores. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 46. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Oeste a Este (calibración). Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 47. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Este a Oeste (calibración). Fuente: Elaboración propia.....	67
Figura 48. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Sur a Norte (calibración). Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 49. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Norte a Sur (calibración). Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 50. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Oeste a Este (validación). Fuente: Elaboración propia.....	71

Figura 51. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Este a Oeste (validación). Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 52. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Sur a Norte (validación). Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 53. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Norte a Sur (validación). Fuente: Elaboración propia.....	73
Figura 54. Tabla de Análisis de Riesgo Caso I. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Figura 55. Tabla de análisis de riesgo para el caso II. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 56. Tabla de análisis de riesgo para el caso III. Fuente: Elaboración propia.....	76
Figura 57. Tabla de análisis de riesgo para el caso IV. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 58. Distribución de los sensores de proximidad, ocupación y los semáforos en el trébol. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 59. Comparativa de velocidades en el lazo sur - oeste. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 60. Comparativa de velocidades en el lazo norte - este. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 61. Comparativa de velocidades en el lazo sur – este. Fuente: Elaboración propia.	81

1 CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 Antecedentes.

El crecimiento acelerado de Lima Metropolitana, junto con el incremento del parque automotor ha generado problemas de orden social, económico, ambiental y político, debido a la falta de una adecuada planificación del transporte. De acuerdo con la realidad que presenta nuestra zona de estudio conlleva a que existan diferentes conflictos entre ellos la pérdida de tiempo de viaje de las personas que se trasladan por motivos de trabajo, estudios, entre otros.

Por ello, el artículo presentado por el observatorio Lima Cómo Vamos, en el 2017 menciona que el transporte colectivo es el modo más utilizado en el que se movilizan las personas, donde un 73.4% es usuarios de transporte colectivo, un 16.3% es usuario del transporte individual, y finalmente solo un 8.9% se moviliza mediante transporte no motorizado. La congestión vehicular ocasionada por la infraestructura vial y las maniobras temerarias de los conductores afecta la salud de las personas por estar expuestas a un prolongado tiempo de viaje, generando que sufran estrés, ansiedad y como consecuencia reduciendo la calidad de vida.

Actualmente, dicha intersección no tiene ningún tipo de control, esto genera mayor congestión en el transporte vehicular de pasajeros y de carga. Es claro que el tráfico vehicular es un problema que necesita más de una solución. Por ello, nuestro estudio se enfocará en evaluar el comportamiento operacional de la intersección y así poder identificar el embotellamiento que se genera en las confluencias, de modo que se pueda reducir los tiempos de viaje y aumentar las velocidades de los vehículos.

1.2 Realidad Problemática.

La congestión vehicular en las redes viales de una ciudad es un fenómeno común especialmente durante las horas pico. Según TomTom (2019), en su último informe de tráfico de Lima, ubicó a la ciudad en el puesto siete de mayor congestión vehicular en el mundo, y respecto a Latinoamérica ocupa el segundo lugar

Un intercambio vial a desnivel tipo trébol tiene como objetivos: ordenar el volumen vehicular; reducir los cuellos de botella existentes; minimizar la congestión vehicular en

puntos específicos; y generar beneficios para los usuarios, como la reducción en el uso del combustible y aceite, y la disminución de la frecuencia de accidentes (ASSHTO, 2018).

No obstante, debido al aumento de la demanda vehicular a través del tiempo, el trébol pierde su capacidad causando nuevamente problemas de congestión. Por lo general estos problemas se presentan como puntos de conflicto en los lazos que confluyen hacia las vías principales, en donde se genera el ingreso desordenado de los vehículos producido por las maniobras temerarias de los conductores. Otro de los problemas es la inadecuada dosificación de las longitudes de cola que reduce la velocidad de operación de los vehículos en la vía principal.

Para el caso de estudio se seleccionó un trébol ubicado entre dos vías con un importante volumen vehicular en la ciudad de Lima. La Panamericana Sur que alberga cerca de 70 000 veh/día y la avenida Javier Prado donde circulan cerca 115 000 veh/día (JICA, 2013).

Ante esta problemática se pueden utilizar diferentes herramientas para proponer alternativas de solución como los modelos de simulación y los Intelligent Transport System (ITS). Esta investigación busca evaluar el comportamiento operacional de un trébol, y optimizar su funcionamiento aplicando semaforización inteligente con la metodología Ramp metering utilizando el algoritmo ALINEA. Para ello se utilizarán detectores que midan el porcentaje de ocupación en las vías principales. Además, se agregarán detectores de presencia y de pase en los lazos de confluencia del trébol con el fin de regular el tiempo de los ciclos semafóricos en tiempo real.

Las consideraciones principales en las que será necesario centrarse son: velocidad promedio, tiempos de viaje y flujo vehicular, consiguiendo así optimizar el comportamiento operacional de la intersección a desnivel mejorando las características funcionales del trébol.

1.3 Fundamentación.

1.3.1 Formulación del Problema.

¿Cómo podríamos optimizar el comportamiento operacional de las intersecciones a desnivel del país utilizando como modelo el trébol de la avenida Javier Prado?

1.3.2 Hipótesis.

La implementación de las metodologías Ramp metering permiten optimizar el comportamiento operacional y reducir en 15% los tiempos de viaje en la intersección a desnivel, tipo trébol, de la avenida Javier Prado con la carretera Panamericana.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

- Optimizar el comportamiento operacional en las confluencias de vías de una intersección tipo trébol, aplicando semaforización inteligente en cada una de sus hojas, con la metodología Ramp metering.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar el análisis de riesgo en el lugar de estudio y determinar la hora crítica para la toma de datos.
- Caracterizar el comportamiento vehicular en las confluencias de vías.
- Representar el estado actual mediante un modelo de simulación calibrado y validado.
- Proponer un modelo regulado por semáforos inteligentes en base a la metodología Ramp metering.
- Optimizar mediante iteración las ubicaciones de los semáforos y detectores correspondientes para cada intersección.

1.5 Descripción del contenido.

Esta investigación está dividida en 7 capítulos.

- Para el primer capítulo, Generalidades, se realiza una introducción al tema de investigación, y se mencionan los objetivos, hipótesis y las motivaciones de este, también se muestran los indicadores de logro y la limitación de la investigación.
- El segundo capítulo es el de Marco teórico. En él se presentan bases teóricas como Ramp metering, alineas, trébol, semáforos inteligentes sus definiciones y su convergencia con nuestra investigación.
- El tercer capítulo muestra la Metodología. Se define la herramienta a usar para realizar la modelación del estudio, así como también los pasos detallados a seguir de nuestra tesis para recopilar información del proyecto a estudiar, como planos, guías, consultorías, norma, etc.
- El capítulo cuatro es el de Análisis del caso de estudio, en él se desarrolla nuestra propuesta de investigación, se proponen las recomendaciones. Para ello se realizan las pruebas necesarias y se hace el procesamiento de la data para llevarla al análisis en el siguiente capítulo.

- El capítulo cinco es la Micro simulación del trébol donde se ingresarán al modelo los datos tomados en campo y así calibrarlos mediante un segundo conteo para poder validarlos con los parámetros propuestos. Luego se implementará la propuesta semafórica y se realizará un análisis comparativo entre la situación actual y la propuesta semafórica.
- El capítulo seis es el de Resultados y Propuesta Semafórica contiene discusiones, comentarios y comparaciones. se desarrollará la gestión de tránsito a nivel de propuesta.
- Finalmente, el último capítulo es el de Conclusiones y Recomendaciones. Contiene un análisis del resultado, comparativo y una interpretación final.

2 CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Vías Urbanas.

2.1.1 Clasificación de Vías urbanas

Las vías urbanas en la actualización del Sistema Vial Metropolitano de Lima, categoriza las vías de la capital para un fin de ordenamiento y eficiencia de la administración urbana, la cual define a las vías expresas como “aquellas vías que soportan gran volumen de vehículos con circulación de alta velocidad en condición de tránsito libre, sin existir cruces al mismo nivel con otras vías” (Congreso de la República, 2016). Además, señala que en estas vías “el transporte público de pasajeros está restringido y no se permite la circulación de vehículos menores motorizados o no motorizados de dos o tres ruedas, sean de uso público o privado, esta medida alcanza a las vías arteriales y colectoras” (Congreso de la República, 2016).

2.2 Tipos de Vehículos

Las características físicas y las proporciones de vehículos de varios tamaños son las consideraciones principales que se deben tener en cuenta para el diseño geométrico de carreteras. Por lo tanto, es apropiado examinar todos los tipos de vehículos, establecer agrupaciones de clases generales y seleccionar vehículos de tamaños representativos dentro de cada clase para elaborar el diseño. Estos vehículos seleccionados, con peso, dimensiones y características operativas representativas, se utilizan para establecer controles de diseño de carreteras para acomodar clases de vehículos designadas y se conocen como vehículos de diseño. (ASSHTO, 2018).

Para propósitos de diseño geométrico, cada vehículo de diseño tiene mayores dimensiones físicas y un radio de giro mínimo mayor que la mayoría de los vehículos de su clase. Por lo tanto, las dimensiones del vehículo de diseño representan un enfoque conservador. Los vehículos de diseño más grandes generalmente se acomodan en el diseño de autopistas. (ASSHTO, 2018).

Según el MTC (2018) la clasificación del tipo de vehículo según encuesta de origen y destino, empleada por SNIP para el costo de operación vehicular (VOC), es la siguiente:

Vehículo de pasajeros

- Jeep, Auto (VL)
- Bus (B2, B3, B4 y BA)

- Camión C2.

Vehículos de carga

- Pick-up (equivalente a Remolque Simple T2S1)
- Camión C2, C3.
- Camión C3 y C2CR
- T3S2

Tipo de vehículo	Alto total	Ancho Total	Vuelo lateral	Ancho ejes	Largo total	Vuelo delantero	Separación ejes	Vuelo trasero	Radio mín. rueda exterior
Vehículo ligero (VL)	1.30	2.10	0.15	1.80	5.80	0.90	3.40	1.50	7.30
Ómnibus de dos ejes (B2)	4.10	2.60	0.00	2.60	13.20	2.30	8.25	2.65	12.80
Ómnibus de tres ejes (B3-1)	4.10	2.60	0.00	2.60	14.00	2.40	7.55	4.05	13.70
Ómnibus de cuatro ejes (B4-1)	4.10	2.60	0.00	2.60	15.00	3.20	7.75	4.05	13.70
Ómnibus articulado (BA-1)	4.10	2.60	0.00	2.60	18.30	2.60	6.70 / 1.90 / 4.00	3.10	12.80
Semirremolque simple (T2S1)	4.10	2.60	0.00	2.60	20.50	1.20	6.00 / 12.50	0.80	13.70
Remolque simple (C2R1)	4.10	2.60	0.00	2.60	23.00	1.20	10.30 / 0.80 / 2.15 / 7.75	0.80	12.80
Semirremolque doble (T3S2S2)	4.10	2.60	0.00	2.60	23.00	1.20	5.40 / 6.80 / 1.40 / 6.80	1.40	13.70
Semirremolque remolque (T3S2S1S2)	4.10	2.60	0.00	2.60	23.00	1.20	5.45 / 5.70 / 1.40 / 2.15 / 5.70	1.40	13.70
Semirremolque simple (T3S3)	4.10	2.60	0.00	2.60	20.50	1.20	5.40 / 11.90	2.00	1

Figura 1. Datos básicos de los vehículos utilizados para el dimensionamiento de carreteras. Según Reglamento Nacional de Vehículos (D.S. N° 058-2003-MTC). Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.

2.3 Análisis de Riesgos

El objetivo del análisis de riesgo es “descubrir, reconocer y registrar los riesgos presentes en un proyecto de infraestructura vial, esto es, identificar las situaciones que pudiesen afectar a los usuarios de la vía durante la fase de operación, así como las causas que las originan” (Agencia Nacional de Seguridad Vial, 2020, p.87).

Adicionalmente, Bestratén & Pareja (2010) señalan que se deben “establecer prioridades para la eliminación y control de los riesgos y que para esto es necesario disponer de metodologías para su correcta evaluación” (p.1).

Existen diversas metodologías para realizar un correcto análisis de riesgo; sin embargo, es recomendable empezar por las más sencillos. Bestratén & Pareja (2010) plantea que “utilizando pocos recursos se puede detectar muchas situaciones de riesgo y, en consecuencia, eliminarlas” (p.1).

La metodología utilizada será la de matriz probabilidad/consecuencia. La (ANSL, 2020) señala que “esta matriz se utiliza para identificar el nivel de riesgo de los hallazgos y para priorizar el tratamiento sugerido, a partir de dos factores claves”: (p. 87)

- La probabilidad de que se produzca un accidente de tránsito cuando se está expuesto al riesgo.
- Las consecuencias esperadas en caso de producirse un accidente de tránsito.

Ante esto, Bestratén & Pareja (2010), indican que “probabilidad y consecuencias son los dos factores cuyo producto determina el riesgo, que se define como el conjunto de daños esperados por unidad de tiempo. La probabilidad y las consecuencias deben necesariamente ser cuantificadas para valorar de una manera objetiva el riesgo”. (p. 1)

2.4 Modelo y Sistema.

Se entiende como definición de modelo a la representación a menor escala, de un sistema o una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento (RAE, 2019). Además, un sistema complejo se entiende como un conjunto compuesto por muchos elementos que influyen entre sí tanto directa como indirectamente (Cascetta, Pagliara & Papola, 2007, p. 352). Por lo tanto, la construcción de modelos es una actividad que permite replicar y comprender las condiciones del entorno y su funcionamiento, para que, a partir de ellos, se pueda analizar y/o plantear soluciones a los problemas. De igual manera, implica la aplicación de circunstancias y condiciones conocidas por el modelador. (Montenegro & Lozano, 2013).

En la presente investigación, el sistema está conformado por la geometría de la zona de estudio, (intersección de las vías expresas, Javier prado y Panamericana) y lo elementos dinámicos vehiculares existentes.

2.5 Intersección Vehicular

Una intersección se define como el área general donde dos o más caminos se unen o cruzan, incluyendo el camino e instalaciones que permiten movimientos vehiculares dentro del área de cruce. Se considera que cada vía o calzada que se encuentra dentro del área es un tramo de la intersección. (American Association of State Highway and Transportation Officials [ASSHTO], 2018). Según el manual de carretera: Diseño geométrico DG – 2018, existen, principalmente, dos tipos de intersecciones viales, a nivel o desnivel.

2.6 Intersecciones a nivel.

Las intersecciones a nivel se encuentran entre los elementos más complicados de una carretera. Estas intersecciones generalmente tienen menos capacidad que otras secciones de la carretera y es donde ocurren la mayoría de los conflictos de tráfico. Se deben seleccionar criterios que resulten en un diseño equilibrado y rentable, que proporcionen operaciones eficientes anticipadas y bajas frecuencias de choques. Los criterios de diseño también deben satisfacer las necesidades de movilidad, ambientales, escénicas, estéticas, culturales, de recursos naturales y de la comunidad en la medida de lo posible. (ASSHTO, 2018).

2.6.1 Tipos de intersecciones a nivel

Debido a la gran variedad de soluciones que tienen las intersecciones a nivel, no hay soluciones que se puedan aplicar de forma general. Estas intersecciones se clasifican teniendo en cuenta la topografía del lugar, aforo vehicular, tipo de servicio impuesto o requerido, definición de tránsito, nivel de servicio y principalmente, en base a su composición (número de ramales que convergen en ella) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2018). A continuación, se presentan los tipos básicos de intersección a nivel.

Intersección	Ramales	Ángulos de cruzamiento
En T	tres	entre 60° y 120°
En Y	tres	< 60° y > 120°
En X	cuatro	< 60°
En +	cuatro	> 60°
En estrella	más de cuatro	-
Intersecciones Rotatorias o rotondas	más de cuatro	-

Figura 2. Tipos de Intersección a nivel. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2018.

Cada uno de estos tipos básicos de intersección a nivel puede variar considerablemente de acuerdo con su forma, desarrollo o según su grado de canalización. En la siguiente figura se muestra alguna de estas variaciones.

DE TRES RAMALES	EMPALME EN T	SIMPLE	ENSANCHADA	CANALIZADAS

	EMPALME EN Y	SIMPLE		CANALIZADAS

DE CUATRO RAMALES	INTERSECCION EN +	SIMPLE	ENSANCHADA	CANALIZADA

	INTERSECCION EN X	SIMPLE	ENSANCHADA	CANALIZADA

ESPECIALES		EN ESTRELLA		VEASE FIGURA 501.01
		ROTONDA

Figura 3. Variedad de tipos de intersección a nivel. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018”, por MTC, 2018.

2.7 Intersecciones a desnivel

La intersección a desnivel es una solución de diseño geométrico, el cual permite el cruce de dos o más avenidas en diferentes niveles. La construcción de un paso a desnivel tiene como objetivos aumentar el nivel de servicio de intersecciones con alto tránsito vehicular,

optimizar las características funcionales de una intersección y/o mejorar las condiciones de seguridad vial (MTC, 2018).

Además, estas intersecciones, deben de contener las mejores condiciones posibles de seguridad, visibilidad, funcionalidad y capacidad. Existen distintas configuraciones de intercambio vial que se puedan adaptar a los movimientos de giro. El tipo de configuración que mejor se adapta en cada caso está influenciado por el número de tramos de intersección, los volúmenes esperados de movimientos de giro, el tipo de tráfico de camiones, la topografía, la cultura, los controles de diseño y la señalización adecuada. Si bien los intercambios están diseñados para adaptarse a las condiciones específicas del sitio, el patrón de salidas a lo largo de la autopista debe presentar cierto grado de uniformidad. De igual manera, desde el punto de vista del conductor, se recomienda que todos los intercambios tengan un punto de salida ubicado antes de los cruces (AASHTO, 2018).

2.7.1 Clasificación y tipos de intersecciones a nivel

El manual de carretera: Diseño geométrico DG – 2018, plantea la siguiente clasificación y tipos de intersecciones a desnivel:

- Intercambios de Tres Ramas: Tipo Trompeta "T", Direccionales en "T" y Direccionales en "Y".
- Intercambios de Cuatro Ramas con Condición de Parada: Tipo Diamante – Clásico, Tipo Diamante – Partido y Tipo Trébol Parcial (2 cuadrantes).
- Intercambios de Cuatro Ramas de Libre Circulación: Tipo Trébol Completo (4 cuadrantes), Rotatorios, Omnidireccionales, de Tipo Turbina y de más de Cuatro Ramas.

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

Figura 4. Tipos de intersecciones a desnivel. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.

2.7.2 Intercambios de tres lazos

Un intercambio con tres ramos que se intersecan consta de una o más separaciones a desnivel de carreteras y caminos de un solo sentido para todos los movimientos del tráfico. Cuando dos de los tres tramos de intersección forman un camino transversal y el ángulo de intersección no es agudo, se denomina intercambio en T. Cuando los tres tramos de intersección tienen un carácter pasante o el ángulo de intersección con el tercer tramo de intersección es pequeño, el intercambio puede considerarse una configuración en Y. Una distinción clara entre las configuraciones T e Y no es importante. Independientemente del ángulo de intersección y el carácter de la carretera, cualquier patrón de intercambio básico puede aplicarse a una amplia variedad de condiciones. El intercambio de tres ramas se debe utilizar cuando sea imposible o muy poco probable una expansión futura al cuadrante no utilizado. Se debe en parte al hecho de que estos intercambios son muy difíciles de expandir o modificar en el futuro (ASSHTO, 2018). En la siguiente figura se presentan algunos ejemplos de este tipo de intercambio.

Figura 5. Intercambio de tres ramas. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.

2.7.3 Intercambios de cuatro lazos

Los intercambios con cuatro tramos de intersección se pueden agrupar en siete configuraciones generales: rampas en un cuadrante, intercambios de diamantes, intercambios de rotondas, intercambios de diamantes de un solo punto, diamantes divergentes intercambios, hojas de trébol totales o parciales (incluidas rampas en dos o tres cuadrantes), e intercambios direccionales (ASSHTO, 2018)

El intercambio de cuatro ramas se caracteriza por que permite la continuidad de una carretera al momento de incorporarse a otra, con detención en algunos flujos de tránsito. Además, sus características operativas y adaptaciones de cada configuración provocan una libre circulación de todas las vías (MTC, 2018). En siguiente figura, se presentan los dos tipos más característicos de intercambio con y sin condición de parada, los cuales son: tipo diamante y trébol.

Figura 6. Tipos característicos de intercambios de cuatro ramas (diamante y trébol). Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.

2.8 Trébol.

Los tréboles son intercambios viales de cuatro lazos que emplean rampas en forma de bucle para adaptarse a los movimientos de giro a la izquierda. Los intercambios que poseen bucles en los cuatro cuadrantes se denominan "tréboles completos" y todos los demás se denominan "tréboles parciales". A pesar de que esta infraestructura mejora notablemente el flujo vehicular, se deben considerar las siguientes desventajas previo al diseño de un trébol: distancia de viaje adicional para los vehículos que giran a la izquierda, mayor maniobrabilidad para recorrer las vías, menor longitud de desplazamiento en la intersección, la necesidad de áreas relativamente grandes que permitan el ingreso a las vías principales, una doble salida en la línea principal y las dificultades para colocar la señalización para la segunda salida del trébol (AASHTO, 2018).

Las ventajas de aumentar la velocidad deben sopesarse con las desventajas de aumentar el tiempo de viaje, la distancia y el derecho de paso. Además, es posible que los camiones grandes no puedan operar de manera tan eficiente en curvas de menor radio. En algunos casos se necesita un carril adicional continuo para desacelerar, acelerar y zigzaguear entre las rampas dentro y fuera del circuito. Por lo general, se necesita un ancho o largo de estructura adicional para este carril. Cuando el aforo vehicular en una sección del trébol supera los 1.000 vehículos/h, la calidad del servicio global se deteriora rápidamente, lo que genera la necesidad de construir vías colectoras o distribuidoras adicionales. Un circuito rara

vez opera con más de una línea de vehículos, independientemente del ancho de la calzada, y por lo tanto tiene un límite de capacidad de diseño de 800 a 1200 vehículos/h, la cifra más alta es aplicable solo donde no hay camiones y donde la velocidad de diseño para la rampa es de 50 km/h o más. La capacidad de la rampa de bucle es, por lo tanto, un control importante en los diseños de hojas de trébol (AASHTO, 2018).

Figura 7. Partes y estructura base de un trébol. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2018.

2.8.1 Lazos o ramales

Según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018 los lazos o ramales son “aquellos que interconectan las vías involucradas en la intersección vial, pudiendo adoptar una variedad de formas, agrupándose básicamente en tres categorías en función a sus formas: ramales directos, semidirectos y de enlace”

2.8.2 Trébol Completo

En el diseño de un trébol completo debido a que todos los giros a la izquierda se realizan a través de lazos, no existe la necesidad de intersecciones en el cruce. Por lo general, esto disminuye la demora encontrada por estos movimientos y aumenta la eficiencia de las operaciones en el cruce. Los intercambios de hojas de trébol completo requieren más derechos de paso en comparación a otros diseños de intersecciones. Es importante mencionar

que la velocidad de desplazamiento en un lazo se puede aumentar utilizando radios de lazo más grandes. Por otro lado, los radios más estrechos pueden ser más susceptibles a choques en la carretera (Federal Highway Administration [FHWA], 2012).

Adicionalmente, Cuando se utiliza un trébol completo junto con una autopista y la suma del tráfico en dos lazos contiguos del trébol contiguos se acerca aproximadamente a 1,000 vehículos/h, se debe considerar diseñar caminos colectores/distribuidores adicionales. Los carriles de aceleración o desaceleración es una posible alternativa a los caminos colectores/distribuidores (AASHTO, 2018).

Figura 8. Intercambio tipo trébol completo. Adaptado de "A policy of Geometric Design of Highways and Streets 2018", por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018.

2.8.3 Trébol Parcial

El intercambio de hoja de trébol parcial es similar a una hoja de trébol completa, excepto que las rampas del lazo están presentes en tres cuadrantes o menos. Los lazos de trébol parciales se utilizan generalmente cuando el derecho de paso no está disponible en un cuadrante o cuando el tráfico que realiza un movimiento en particular es mucho menor en comparación con otros movimientos. Es importante mencionar que los lazos del trébol parcial deben estar dispuestas de modo que las entradas y salidas causen la menor cantidad de interrupciones en el flujo del tráfico en la carretera principal. Específicamente, si los volúmenes de paso en la carretera principal son mucho más grandes que los volúmenes en

la carretera secundaria, los movimientos de giro importantes deben adaptarse a las entradas y salidas de giro a la derecha. Los tréboles parciales se utilizan principalmente en lugares donde el acceso necesita, derecho de paso, y las configuraciones de la red de calles controlan la configuración del intercambio (Garber & Fontaine, 1999).

Figura 9. Configuraciones parciales de las rampas del trébol, giros y salidas. Adaptado de “A policy of Geometric Design of Highways and Streets 2018”, por American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018.

2.9 Confluencias y Bifurcaciones

Según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018, se entiende que:

El número de carriles en la calzada común antes de una bifurcación (o después de una confluencia), no debe diferir de la suma del número de carriles después de la bifurcación (o antes de la confluencia) en más de una (1) unidad. Excepcionalmente, en casos técnicamente justificados y previa aprobación de la unidad ejecutora del proyecto en la Figura 304.11, serán las mínimas medidas entre la última sección de la calzada común (antes de una bifurcación o después de una confluencia), y la sección en que las calzadas distan un metro (1 m) entre sí (después de una bifurcación o antes de una confluencia) (p. 210).

Figura 10. Confluencias y bifurcaciones. Adaptado de “Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018”, por MTC, 2018.

De igual manera, señala que “en las confluencias y bifurcaciones, la cotangente del ángulo entre los bordes de la calzada deberá ser como máximo, sesenta y cinco (65°) para confluencias y cincuenta (50°) para bifurcaciones” (MTC, 2018).

2.10 Sistemas de semaforización.

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2016), en el “Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras”, señala que los sistemas de semaforización o semáforos “son dispositivos de control del tránsito que tienen por finalidad regular y controlar el tránsito vehicular motorizado y no motorizado, y peatonal, a través de las indicaciones de luces de color rojo, verde y amarillo o ámbar” (p. 365). Estos tres colores representan, respectivamente, la prohibición del tránsito vehicular, el pase de vehículos y/o peatones y la disposición del conductor de “ceder el paso, detener el vehículo, y no ingresar al cruce o intersección vial” (MTC, 2016, p.365).

De igual manera, el MTC (2016) indica que “para el caso de un sistema coordinado de semáforos, se debe contar con unidades de control adyacentes o sucesivas interconectadas; las cuales, controlan sus funciones básicas a través de una Estación Central o Control Maestro” (p.365). Es importante mencionar que se requieren diferentes tipos de unidades de control para regular y controlar la operación de los semáforos (MTC, 2016).

2.10.1 Clasificación de los Sistemas de Semaforización

Existen distintos tipos de operación; las cuales, se adoptan en “función al volumen del tránsito vehicular y la importancia de las vías” (MTC, 2016, p.385). La siguiente clasificación, planteada por el MTC (2016) se basa en los mecanismos de operación y forma de control:

- ***Semáforos fijos o presincronizados:*** Son aquellos que cuentan con una programación de intervalos y secuencia de fases preestablecidos no accionados por el tránsito vehicular. El programa que rige sus características de operación tales como duración del ciclo, desfase, y otros, pueden ser modificados.
- ***Semáforos sincronizados por el tránsito:*** Son aquellos cuyo funcionamiento es sincronizado en todos los accesos a una intersección, en función a las demandas del flujo vehicular y disponen de medios (detectores de vehículos y/o peatones) para ser accionados por éste.
- ***Semáforos adaptados al tránsito denominados también Semáforos Inteligentes:*** son aquellos cuyo funcionamiento es ajustado continua y automáticamente en todos los accesos a una intersección, de acuerdo con la información sobre el flujo vehicular que colectan los detectores de tráfico y envían la información sobre la secuencia de fases, intervalos de fases, ciclos y/o desfases, a una Estación Central o Control Maestro.

Figura 11. Diagrama de clasificación de los sistemas de semaforización. Adaptado de “SISTEMA AUTÓNOMO DE CONTROL DE TRÁFICO VEHICULAR PARA INTERSECCIONES DE AVENIDAS”, por Arce, 2017.

2.11 Semaforización inteligente

Tal como se mencionó anteriormente el MTC (2016) define a los semáforos adaptativos o inteligentes como:

Aquellos cuyo funcionamiento es ajustado continua y automáticamente en todos los accesos a una intersección, de acuerdo con la información sobre el flujo vehicular que colectan los detectores de tráfico y envían la información sobre la secuencia de fases, intervalos de fases, ciclos y/o desfases, a una Estación Central o Control Maestro (p.385).

Ghazal, El Khatib, Chahine, y Kherfan (2016) mencionan que para realizar el diseño de semáforos inteligentes se deben aplicar modelos basados en las siguientes consideraciones: ecuaciones matemáticas con el fin de estimar el tiempo de espera del automóvil en un cruce; número de automóviles en la cola de espera; extensión de los automóviles en espera a lo largo del carril e intervalos de tiempo óptimos para las luces verdes, amarillas y rojas.

Debido a que las dependencias mutuas generadas entre algunas intersecciones cercanas ocasionan una formulación complicada al momento de realizar la configuración de los

semáforos adaptativos; constantemente se proponen diversas metodologías y se implementan muchas técnicas aprovechando los avances tecnológicos de las microcomputadoras, los dispositivos y sensores de fabricación reciente, y los algoritmos innovadores que modelan, en la medida de lo posible, los semáforos. (Ghazal et al., 2016)

2.18 Ramp Metering.

Ramp Metering es una estrategia que se utiliza para regular el volumen de vehículos que ingresan a una autopista en un momento dado, buscando su óptimo funcionamiento. El acceso a la autopista se controla con una señal de tráfico que funciona con un algoritmo que utiliza datos de tráfico del sistema en tiempo real para determinar la velocidad a la que los vehículos deben ingresar a la autopista. Así, se evita que los vehículos que se encuentran en la vía principal reduzcan su velocidad debido al espacio entre los vehículos ingresantes (Federal Highway Administration [FHWA], 2014). Lo que permite una reducción de la demanda en las autopistas al controlar el flujo de vehículos que ingresan a una calzada principal ya congestionada (Sykes, 2010).

La metodología Ramp Metering emplea señales de tráfico instaladas en rampas de autopistas para controlar la frecuencia con la que los vehículos ingresan al flujo de tráfico principal. Esta metodología reduce la congestión general de la autopista al administrar la cantidad de tráfico que ingresa a la vía principal y al dividir los pelotones que dificultan la incorporación con esta (Mizuta, Roberts, Jacobsen, & Thompson, 2014)

Como se puede ver en la siguiente figura, los vehículos que vienen de vías arteriales forman una línea detrás de la línea de alto y son liberados gradualmente según la señal del semáforo a una velocidad óptima, teniendo en cuenta las condiciones de la vía principal. Aunque esta es la configuración más habitual, también puede haber rangos de prioridad para vehículos de alta ocupación (HOV), diferentes configuraciones de detectores y otros cambios debido a la geometría y las políticas locales.

Figura 12. Configuración de Ramp Metering. Adaptado de “Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy—A Primer”. por Mizuta, Roberts, Jacobsen, & Thompson, 2014.

Para los modelos Vissim que utilizan Ramp Metering, su funcionalidad debe coincidir lo más posible con las condiciones reales. Esta metodología se puede aplicar con controladores de acceso de tiempo fijo para configurar semáforos estáticos. En la actualidad, existen semáforos dinámicos que son guiados por distintos algoritmos; los cuales, dependen de la velocidad/densidad de la línea principal o de la cola arterial para configurar su tasa de medición y así definir el tiempo del ciclo semafórico. Estos algoritmos se pueden configurar utilizando la extensión VisVAP de VISSIM. La lógica de esta extensión debe calibrarse para replicar las condiciones identificadas en campo. (Virginia Department of Transportation [VDOT], 2020).

2.18.1 Componentes de Ramp Metering

Ramp metering requiere algunos componentes y equipos esenciales para operar de manera segura y efectiva. La configuración, comunicación y seguridad son objetivos que se deben considerar al colocar señales de parada, detectores y letreros (Mizuta et al., 2014). Los siguientes son componentes clave en la mayoría de las configuraciones de Ramp metering:

- **Detectores:** Los detectores son necesarios para monitorear la condición en la rampa y la vía principal. Por ejemplo, la señal solo debe ponerse verde cuando se detecta un vehículo en la barra de parada. Los detectores también pueden monitorear la demanda en la línea principal y fusionar puntos para ayudar a determinar la tasa de medición. El equipo de detección debe conectarse directamente al gabinete de control.
- **Semaforización:** Las señales semafóricas de parada que se utiliza en Ramp metering constan de dos o tres secciones. Las señales de dos secciones tienen indicaciones en verde y rojo. En cambio, las señales de tres secciones incluyen la indicación amarilla, estas resultan más familiares para la mayoría de los conductores.
- **Controlador:** Interpreta los datos recopilados por los detectores y cambia los tiempos de los semáforos, utilizando algoritmos específicos.
- **Señalización:** Las señales deben colocarse al inicio de la rampa y cerca del semáforo. El contenido de la señal puede proporcionar instrucciones a los vehículos cuando ingresan a la rampa y en la señal. La señalización adecuada facilita una comunicación clara y el cumplimiento del sistema establecido.

2.18.2 Detectores

El MTC (2018), define a los detectores como aquellos “dispositivos capaces de registrar variables del tránsito tales como, volumen, velocidad, presencia de vehículos, sentido de circulación, tipo de tránsito, intervalos o brechas, y otros” (p.376). Estos detectores “pueden estar empotrados, ser fijados en la superficie del pavimento o colocarse en la calzada o a un costado de la vía. Los detectores normalmente forman parte integral de los semáforos adaptativos; los cuales, son accionados por el comportamiento vehicular” (MTC, 2018, p.376).

La metodología Ramp metering requiere un conjunto obligatorio de detectores. Además, se pueden instalar detectores opcionales para proporcionar una amplia gama de operaciones. (Chaudhary, Tian, Messer, & Chu, 2004). La siguiente tabla proporciona un resumen de los detectores que se pueden usar en un sistema de Ramp metering.

Tabla 1. *Tipos de detectores en la metodología Ramp metering.*

Tipo de Detector	Localización	Aplicación
Vía Principal	Ubicado en la carretera principal aguas arriba y/o aguas abajo de la entrada de la rampa a la vía.	Proporciona información sobre la ocupación, velocidad o el volumen de la autopista que se utiliza para seleccionar la tasa de Ramp metering local.
Cruce	Situado entre la intersección y la línea de parada de la rampa de acceso	Principalmente se utiliza para proporcionar datos de recuento en rampa. En algunos casos, se utiliza para determinar cuándo se debe encender y apagar el sistema.
Paso	Colocado inmediatamente aguas abajo de la línea de parada.	Se utiliza en algunos casos para determinar la duración de la señal verde en el carril especificado
Demanda	Colocado inmediatamente aguas arriba de la línea de parada.	Detecta la presencia del vehículo en la línea de parada y enciende el semáforo en verde para ese carril en específico según la estrategia utilizada.
Fila Secundaria	Ubicado aproximadamente a medio camino entre la línea de parada y la entrada a la rampa de acceso.	Provoca que la tasa de Ramp metering aumente gradualmente para controlar la distancia de la fila.
Fila Principal	Ubicado cerca de la entrada a la rampa de acceso (generalmente dentro de los 30 metros)	Supervisa las filas excesivas que no se puedan almacenar en el espacio designado. Maximiza la tasa de descarga de Ramp metering para despejar las filas excesivas.

Nota: Colocación y aplicación de detectores utilizados en Ramp metering. Adaptado de “Ramp Metering Algorithms and Approaches for Texas”, por Chaudhary et al, 2004)

2.18.3 Semaforización

Las señales semaforización utilizadas en rampas, lazos o ramales son una técnica importante de gestión del tráfico diseñada para mantener el tráfico fluido en las carreteras y ayudar a reducir los choques. Estas señales cambian de luces rojas a verdes con el fin de regular la

velocidad a la que los vehículos ingresan a la carretera para reducir las interrupciones causadas por el tráfico en la fusión de las entradas. Sirven para mejorar el flujo vehicular en la línea principal y ayudan a los conductores a ingresar a la carretera de manera segura y más eficiente. Funcionan según las condiciones del tráfico en tiempo real y, por lo general, se activan durante el período de las horas pico entre semana para aliviar la congestión durante los períodos de uso intensivo de la autopista (Florida Department of Transportation [FDOT], 2010).

Los semáforos están destinados a proporcionar a los usuarios información sobre el derecho de pase en las intersecciones y / o secciones de la carretera donde el espacio se encuentra en disputa por dos o más movimientos en conflicto. De igual manera, se utiliza para advertir la presencia de situaciones, en la carretera, que pueden comprometer la seguridad del usuario. (Conselho Nacional de Trânsito [CONTRAN], 2014).

Según CONTRAN (2014), una señalización semafórica puede ser clasificada según su función, como:

- ***Señalización semafórica de regulación:*** Tiene la función de controlar el tráfico en una intersección o tramo de vía, a través de señales luminosas, alternando el derecho de paso entre los distintos flujos de vehículos y/o peatones.
- ***Señalización semafórica de advertencia:*** Cumple con la función de advertir sobre la existencia de un obstáculo o situación peligrosa, debiendo el conductor reducir la velocidad y adoptar las medidas de precaución compatibles con la seguridad para continuar su recorrido.

2.18.3.1 Señales de paso

CONTRAN (2014) no especifica cómo se deben configurar los semáforos cuando se usa la medición en rampa, pero dice que, para controles de acceso específicos, como plazas de peaje y transbordadores, el semáforo debe tener puntos rojos y verdes, dispuestos en este orden, de arriba hacia abajo en vertical y de izquierda a derecha en horizontal. Esta configuración es ampliamente utilizada y recomendada en la práctica de medición en rampa (CHAUDHARY et al., 2004).

Se debe colocar un semáforo por cada carril utilizado para el stock de cola en la rampa de acceso (Simpson, Riley, & United Civil Group, 2013). El ciclo del semáforo varía según el tipo de operación elegida.

2.18.3.2 Señales de advertencia

En cuanto a las señales de advertencia, CONTRAN (2014) recomienda que se utilice un semáforo con dos puntos amarillos intermitentes, parpadeando a una frecuencia de 1Hz. Esta configuración también es compatible con manuales internacionales (CHAUDHARY et al., 2004). Los carteles de advertencia deben colocarse en la entrada de la rampa de acceso, con un semáforo para cada rango de stock de cola, junto al detector de acumulación de cola (Simpson et al., 2014). Esta señalización está destinada a indicar a los conductores que el sistema de medición de rampa está activado.

2.19 Operaciones aplicadas en Ramp Metering

Dependiendo de la infraestructura existente, limitaciones u objetivos del sistema, se puede seleccionar distintas operaciones de Ramp metering (Mizuta et al., 2014). Cuando no existe un cuello de botella entre la rampa de acceso y la vía principal, la rampa de acceso no controlada tiene una capacidad de aproximadamente 1800 a 2200 vehículos por hora (vph). Utilizando Ramp metering, este valor se reducirá y la capacidad teórica máxima variará según el tipo de operación deseada (Chaudhary et al, 2004).

2.19.1 Tipos de Operación

A continuación, Mitzutal et al. (2014), describe los tipos de operaciones comúnmente utilizadas en Ramp metering:

- ***Medición de un solo carril o de varios carriles:*** La medición de un solo carril permite que solo un vehículo ingrese a la autopista durante cada ciclo de señal. La medición de varios carriles requiere que se proporcionen dos o más carriles en la rampa y un semáforo dedicado a cada carril. Después de la línea de parada, se requiere que los carriles se unan en un solo carril antes de incorporarse a la autopista. Ante esto, es importante mencionar que Chaudhary et al. (2004) indica que el valor recomendado de un ciclo debe ser de 4.5 segundos con 2.5 segundos de rojo; debido a que, teóricamente, si se utiliza el ciclo más corto posible de 4 segundos, con 2 segundos de verde y 2 segundos de rojo, los vehículos no se detendrían con eficacia

y que cualquier vacilación por parte del conductor podría provocar la pérdida de un ciclo y retrasar el sistema.

- ***Medición de liberación simple o doble:*** En este enfoque un vehículo ingresa cada señal verde (o medición de liberación única); es decir, que opera con un menor tiempo en comparación con utilizar un enfoque de dos vehículos por cada señal verde (o liberación doble). La liberación doble permite que dos vehículos ingresen a la autopista en cada ciclo, pero requiere un tiempo verde más prolongado. El enfoque de medición de liberación dual generalmente aumenta la capacidad de rampa bajo medición.
- ***Conexiones de autopista a autopista:*** Aplicar Ramp metering en las rampas de autopista a autopista es menos común debido a las altas velocidades de viaje y a la percepción del aumento potencial de colisiones debido a las filas de vehículos. También existen restricciones geométricas, como distancia de visión limitada a lo largo de una carretera curva y disposiciones limitadas para proporcionar el almacenamiento requerido para los vehículos en las rampas. Esta medición puede mejorar significativamente la capacidad de administrar el tráfico en una autopista debido a que gran parte del tráfico que ingresa está controlada por medidores.
- ***Carriles de derivación:*** Los carriles de derivación permiten que un tipo específico de vehículo (generalmente un HOV, un autobús o, en algunos casos, un camión) evite demoras en los medidores de rampa y tenga el derecho de paso para incorporarse directamente a la autopista.

2.20 Enfoques utilizados en Ramp Metering

Existen varios enfoques, así como algoritmos, que se pueden utilizar para Ramp metering. Estos se eligen en función de las condiciones locales y necesidades específica. Los enfoques de Ramp metering se pueden dividir en dos tipos, operando bajo dos métodos de control.

2.20.1 Tipos de Enfoques

A continuación, se abordarán los aspectos fundamentales de cada uno, así como sus características principales (Jacobson, Stribiak, & Sallma, 2006):

1. Pre-cronometrado (también conocido como tiempo fijo)

En este enfoque, los ciclos semafóricos de Ramp metering están preestablecidos según las condiciones históricas y se fijan según la hora del día. Los medidores se activan según horarios preestablecidos. Dentro de este enfoque tenemos:

- **Control local (o aislado):** El control local es un proceso de selección de valores de medición en función de las circunstancias presentes de una rampa individual, en lugar de las condiciones a lo largo de un segmento de autopista, corredor de autopista o red de autopista regional. Por lo tanto, el control local es apropiado para rampas no adyacentes donde los problemas están aislados. Cuando se usa la medición de rampa local, se pueden medir una o más rampas; sin embargo, la principal preocupación es mejorar las condiciones y reducir la congestión cerca de la rampa local. En algunos casos los problemas de congestión pueden parecer solucionados, cuando en realidad se transfieren o se descubren en ubicaciones aguas abajo.
- **Control de todo el sistema (o coordinado):** A diferencia de la medición de rampa local, el control de todo el sistema se puede utilizar para un segmento de autopista, un corredor completo o varios corredores de autopista donde los problemas se extienden de una rampa a otra adyacente. Por lo tanto, la preocupación principal se centra en mejorar las condiciones de las autopistas para un sistema o sistemas de autopistas más amplios. Esto hace que el control coordinado sea más flexible que el control local para manejar posibles retrasos, colisiones y bloqueos de carreteras, y así garantizar que los medidores de rampa permanezcan operativos incluso si se pierden las comunicaciones. Cuando se miden varios corredores, se debe considerar la posibilidad de medir las rampas de autopista a autopista.

2. Tráfico adaptativo

Las estrategias de respuesta de tráfico adaptativo utilizan detectores u otros sistemas de vigilancia para calcular o seleccionar los valores que se utilizarán en Ramp metering según las condiciones en tiempo real de la autopista. Estos sistemas de medición a menudo producen resultados que son generalmente entre un cinco y diez por ciento mejores que los de la medición pre-temporizada. Un enfoque de respuesta

al tráfico se puede utilizar a nivel local o en todo el sistema. Los cuales se analizan a continuación.

- **Sensible al tráfico local:** Los métodos de medición que responden al tráfico local basan las tasas de medición en las condiciones de la autopista cerca de la rampa con medidor (es decir, inmediatamente aguas arriba y aguas abajo de la rampa, o en el punto de fusión). A diferencia de los sistemas pre-cronometrados, se requiere la vigilancia de la autopista mediante detectores de tráfico. Aunque este sistema sea más costoso se adapta con mayor facilidad frente a las condiciones cambiantes y pueden proporcionar mejores resultados que sus contrapartes previamente programadas.
- **Sensible al tráfico en todo el sistema:** El objetivo de este enfoque es optimizar el flujo de tráfico a lo largo de un tramo de la carretera, en lugar de un punto específico de la autopista (como es el caso de los sistemas sensibles al tráfico local). Como tal, las tasas de medición en cualquier rampa se verán influenciadas por las condiciones del del sistema o corredor que se evalúe. Debido a esto, se necesitan datos de detectores aguas abajo y/o detectores aguas arriba en múltiples ubicaciones, principalmente de controladores de señales transversales y de la computadora central. Los sistemas que responden al tráfico de todo el sistema tienen la configuración de hardware más compleja en comparación con los otros enfoques de medición; es decir, que responden al tráfico local y pre-cronometrado.

2.21 Algoritmo ALINEA

ALINEA es un algoritmo de programación de Ramp metering el cual ajusta la dosificación vehicular de los accesos para mantener el porcentaje de ocupación deseado aguas abajo, tal como se puede observar en la figura 7. Para este propósito, se utiliza un semáforo guiado por un algoritmo con un ciclo semafórico, el cual se retroalimenta según el porcentaje de ocupación obtenido por los sensores de las vías principales. De acuerdo con la fórmula que se muestra a continuación (Papageorgiou, Hadj-Salem y Middelham, 1997).

$$r(k) = r(k - 1) + KR[\hat{O} - O_{out}(k - 1)]$$

Donde:

- $k = 1, 2, \dots$ índice de tiempo discreto.

- $r(k)$: capacidad de flujo admisible en el ciclo k .
 - r_{min} : capacidad mínima de flujo
 - r_{max} : capacidad máxima de flujo
- $O_{out}(k-1)$: última ocupación vehicular medida aguas abajo (%).
- KR : factor regulador para ajustar las perturbaciones constantes del control de retroalimentación.
- $\hat{o}$: porcentaje de ocupación deseado aguas abajo (Papageorgiou et al., 1997).

Figura 13. Estrategia ALINEA. Adaptado de “Local Ramp Metering Strategy ALINEA: Microscopic Simulation Based Evaluation Study on Istanbul Freeways”, por Abuamer, & Celikoglu, 2017.

ALINEA tiene cuatro parámetros que deben calibrarse: KR , $\hat{O}$, la ubicación del detector aguas abajo y el ciclo de actualización de cada Ramp metering $r(k)$. Papageorgiou, Papamichail, Kosmatopoulos y Wang (2008) recomiendan que el valor de KR sea igual a 70 veh/h/% como medida estándar en la mayoría de las aplicaciones de simulación o de campo ALINEA. De igual manera, la tasa de medición $r(k)$ resultante de la ecuación de ALINEA debe estar dentro de los parámetros (r_{min} , r_{max}) para evitar el cierre de la rampa. Donde r_{max} debe ser la capacidad máxima de flujo admisible con un valor aproximado de 1800 Veh/h y $r_{min} > 0$ es el valor mínimo de flujo admisible, típicamente de 200 a 400 vph. Además, Papageorgiou, Hadj-Salem y Blosseville (1991) y Chu, Liu, Recker y Zhang (2004) sugieren que la ubicación del detector aguas abajo debe estar en el punto originado por la congestión,

generalmente ubicado entre 40 y 500 m aguas abajo del final de la rampa. Las estrategias de Ramp metering local se activan en cada intervalo de tiempo T , cuyo valor se selecciona típicamente en el rango de 20 a 60 s; sin embargo, si el tiempo de actualización es mínimo, la ubicación del detector debe estar cerca de la rampa de entrada, de lo contrario se puede producir congestión entre la confluencia y el detector (Papageorgiou et al., 2008). De igual manera, Papageorgiou et al (1991) recomienda que la tasa de ocupación deseada tenga un valor de 0.30.

2.22 VisVAP

Abreviatura de Visual VAP, PTV AG (2018) lo define como una herramienta para definir la lógica del programa de los controladores de señales VAP como un diagrama de flujo. Todos los comandos VAP se enumeran en una biblioteca de funciones. La función de exportación permite a los usuarios generar archivos VAP, lo que guarda cambios adicionales en el archivo VAP. Además, menciona que esta herramienta proporciona una función de depuración que durante una simulación en ejecución en Vissim permite a los usuarios pasar por la lógica de control paso a paso utilizando la lógica de control. También muestra los valores actuales de todos los parámetros utilizados en la lógica.

2.23 Microsimulación del tráfico.

La microsimulación es el modelado del movimiento de vehículos individuales en un segundo o subseguido con el propósito de evaluar el desempeño del tráfico de los sistemas de carreteras y calles, tránsito y peatones. Los análisis de microsimulación son cada vez más visibles e importantes, fomentados tanto por la evolución continua de la capacidad del software de microsimulación, como por la creciente aplicación en las prácticas de planificación e ingeniería del transporte (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019).

Debido a la naturaleza aleatoria de los modelos de microsimulación estos deben de ser probados múltiples veces, con la finalidad de lograr un nivel de fiabilidad determinado. Asimismo, deben ser calibrados y validados, para obtener una buena representación de la realidad (Cabrera & Dextre, 2014).

Los modelos de microsimulación también se pueden considerar como representaciones o estimaciones complejas de un escenario de tráfico; el cual, requiere el uso de herramientas computacionales y software especializado para su montaje, configuración y calibración (Montenegro & Lozano, 2013). Tal como señala Cabrera (2015) existen más de 60

programas de microsimulación, pero no en todos se puede representar la realidad peruana. Como ejemplo tenemos a VISSIM, PARAMICS, SIMTRAFFIC y AIMSUN, entre otros.

Debido a la gran utilidad para evaluar y optimizar diferentes sistemas complejos de gestión y control de tráfico la simulación microscópica de tráfico se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para evaluar y optimizar diferentes sistemas complejos de gestión y control de tráfico. En donde la dinámica de red de tráfico del mundo real se puede replicar de forma realista, mediante la simulación del movimiento de un vehículo individual a través de la red (Al-Ahmadi, Jamal, Reza, Assi, & Ahmed, 2019).

2.24 Vissim

Es un programa de simulación microscópica, orientado al paso del tiempo y basado en el comportamiento vehicular y peatonal que se utiliza para modelar flujo de tráfico urbano y rural, transporte público por ferrocarril y/o carretera, transporte privado, transporte multimodal y flujos de peatones. Esta simulación se realiza bajo diversas restricciones como: distribución de carriles, composición del vehículo, control de señales y registro de vehículos públicos y privados. (Planung Transport Verkehr [PTV AG], 2018).

Este software se basa en un modelo de seguimiento de automóviles para modelar la conducción en una vía de un solo carril, que se define como modelo de flujo vehicular) y en un modelo de cambio de carril. El modelo de flujo vehicular es un modelo de seguimiento que permite analizar la interacción entre los controles de señal adaptativos y las recomendaciones de rutas en redes viales (PTV AG, 2018). De igual manera, permite simular la interacción entre flujos peatonales y transporte público y/o privado y también ayuda en la planificación de la evacuación de edificios, estadios y diversas edificaciones. Vissim puede utilizar múltiples y también diversos programas de control de señales externas en una simulación, por ejemplo, VAP y VSPLUS y permite la comunicación entre el modelo de flujo de tráfico y el control de señales de tráfico (PTV AG, 2018).

2.24.1 Aplicaciones de VISSIM.

Según PTV AG (2018) los siguientes casos representan algunas posibles áreas de aplicación:

- Comparación de alternativas de diseño y geometría en intersecciones viales.
- Planificación del desarrollo del tráfico vehicular.
- Planes de desarrollo urbano.

- Análisis de capacidad vial.
- Sistemas de control de tráfico.
- Operaciones de sistemas de señales y estudios de reprogramación vial y semafórica.
- Simulación de transporte público.
- Estudios de viabilidad y de impacto de tráfico en el transporte urbano.

2.25 Parámetros microscópicos.

En autopistas bastante congestionadas, los conductores se ven obligados a seguir un patrón de reacción determinado en lugar de tomar sus propias decisiones, estos reaccionan principalmente a los eventos de tráfico que se avecinan. Sin embargo, en una escala macroscópica, el acoplamiento de muchos vehículos individuales puede conducir a ciertos estados (fases) de tráfico, como parar y arrancar o flujo sincronizado. (Berg & Wilson, 2003)

Por lo tanto, se define en función del tiempo y se consideran: brecha, intervalo, longitud o distancia y se encuentran: espaciamiento, separación y longitud del vehículo. En la Figura 3. se muestra un esquema que relaciona los parámetros microscópicos del tránsito vehicular.

Figura 14. Relaciones de tiempo y espacio entre vehículos. Adaptado de “Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones”, por Reyes, Espíndola & Cárdenas, 2007.

Para poder definir los parámetros microscópicos es necesario explicar primero los parámetros temporales. Entre estos, la longitud se define como el largo medido de un vehículo, la separación es la distancia entre los extremos de dos vehículos contiguos, y el espaciamiento es la suma de la longitud y de la separación. Entre los parámetros temporales, el paso se define como el tiempo que transcurre para recorrer la longitud de un vehículo, la brecha es el tiempo que demora en recorrer la separación entre vehículos y finalmente el intervalo es la suma de los tiempos del paso y la brecha (Arce, 2017)

2.26 Variables relacionadas con el flujo vehicular.

- Tasa de flujo (q): Número de vehículos, N, que pasan durante un intervalo de tiempo específico.
- Número de vehículos(N) pasan durante un intervalo de tiempo específico
- Tiempo (T): inferior a una hora expresada en (veh/min) o (veh/s).

$$q = \frac{N}{T}$$

2.27 Modelo de Seguimiento Vehicular – Wiedemann.

El modelo de Wiedemann, es un modelo de percepción psicofísica empleado por el software PTV VISSIM que tiene en cuenta los aspectos psicológicos y restricciones fisiológicas de la percepción de los conductores para simular el flujo de tránsito vehicular (PTV AG, 2018).

El concepto del modelo de Wiedemann se basa en la desaceleración progresiva del vehículo que se desplaza a mayor velocidad, a medida que alcanza un umbral de percepción individual, según el vehículo precedente que se moviliza con una velocidad menor. Dado que no puede determinar la velocidad del vehículo que le precede, disminuye su velocidad por debajo de éste para luego acelerar hasta alcanzar otro umbral de percepción; es decir, que existe una aceleración y desaceleración leve y constante. Este umbral de percepción puede describirse como una función de la diferencia de velocidad y distancia (PTV AG, 2018).

Asimismo, PTV AG (2018) indica que en el modelo de flujo de tráfico de Wiedemann se existen cuatro estados de conducción para un conductor, los cuales son:

- **Conducción libre:** No se observa influencia de los vehículos precedentes. En este estado, el conductor busca alcanzar y mantener la velocidad deseada. En realidad, la velocidad en conducción libre variará debido a un control de aceleración imperfecto que siempre oscilará alrededor de la velocidad deseada.
- **Aproximación:** Proceso del conductor adaptando su velocidad a la velocidad más baja de un vehículo precedente. Al acercarse, el conductor desacelera, de modo que no hay diferencia de velocidad una vez que alcanza la distancia de seguridad deseada.
- **Seguimiento:** El conductor sigue al automóvil que le precede sin desacelerar o acelerar conscientemente. Mantiene la distancia de seguridad de manera casi

constante. Sin embargo, debido a un control de aceleración imperfecto, la diferencia de velocidad oscila alrededor de cero.

- **Frenado:** El conductor aplica tasas de desaceleración media a alta si la distancia al vehículo precedente cae por debajo de la distancia de seguridad deseada. Esto puede suceder si el conductor del vehículo cambia abruptamente su velocidad.

Para cada uno de los cuatro estados de conducción, la aceleración se describe como resultado de la velocidad actual, la diferencia de velocidad, la distancia al vehículo precedente y las características individuales del conductor y del vehículo. (PTV AG, 2018).

Figura 15. Lógica de seguimiento vehicular (Wiedemann 1974). Adaptado de VISSIM 5.40 - Manual del usuario, por PTV Planung Transport Verkehr AG, 2012.

El software VISSIM utiliza los siguientes parámetros de modelo de seguimiento de Wiedemann según el modelo de comportamiento de los vehículos, estos son:

- Wiedemann 74: Modelo apto principalmente para tráfico urbano y zonas de entrecruzamiento.

- Wieddeman 99: Modelo idóneo principalmente para el tráfico de autopistas sin áreas de unión.

Debido a que la presente investigación se realiza en una confluencia vial ubicada dentro de la ciudad el parámetro que se modificó es el de Wiedemann 74, el cual es una versión mejorada del modelo de seguimiento de vehículo de Wiedemann 1974 (PTV AG, 2019). En el software VISSIM se pueden modificar los siguientes valores:

- ***Distancia media en detención (ax)***: Define la distancia deseada promedio entre vehículos detenidos. Tiene una tolerancia de -1.0 m y +1.0 m que es normalmente distribuida en torno a 0.0 m con una desviación estándar de 0.3 m. Su valor predeterminado es de 2.0.
- ***Parte aditiva de la distancia de seguridad (bx_{add})***: Este valor se utiliza para el cálculo de la distancia de seguridad deseada [d]. Permite ajustar los valores de los requisitos de tiempo. Por defecto tiene un valor de 2.0
- ***Parte multiplicativa de la distancia de seguridad deseada (bx_{mult})***: Permite ajustar los valores de los requisitos de tiempo. Se utiliza para el cálculo de la distancia de seguridad deseada [d]. A mayor valor existirá una mayor distribución (desviación estándar) de la distancia de seguridad. Tiene un valor predeterminado de 3.0.

La distancia [d] entre dos vehículos es calculada usando la siguiente fórmula:

$$d = ax + bx$$

Donde:

ax = Distancia de detención

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} * z) * \sqrt{v}$$

Donde:

v = Velocidad del vehículo (m/s)

z = Valor que está en el rango [0, 1], normalmente distribuido en torno a 0.5 con una desviación estándar de 0,15.

2.28 Microsimulación en VISSIM

2.28.1 Nivel de aleatoriedad.

Según el nivel de aleatoriedad existen dos tipos de modelos para micro simular el flujo de tráfico, los determinísticos y los estocásticos. En los modelos determinísticos se asumen que no hay variación en las características de conductores y vehículos. En contraste, los modelos estocásticos utilizan a partir de distribuciones estadísticas, números aleatorios para asignar características y parámetros del conductor y del vehículo. La secuencia de números aleatorios generados depende del método utilizado y el valor inicial del número aleatorio (número de semilla). El cambio del número de semilla genera una secuencia de números aleatorios, que, a su vez, produce diferentes valores de las características tanto del conductor como del vehículo (Dowling, Skabardonis, & Alexiadis, 2004).

2.28.2 Número de Semillas.

Una semilla aleatoria especifica el punto de inicio cuando una computadora genera una secuencia de números aleatorios. Puede ser cualquier número.

De acuerdo con el modelo microscópico, el número de semilla es el valor inicial utilizado para la generación de una secuencia interactiva de valores aleatorios. Además, a partir de esta distribución de valores, los modelos de microsimulación asignan las características y el comportamiento del conductor y del vehículo frente a situaciones específicas. La secuencia de números aleatoriamente generados depende del valor inicial del número de semilla. Cambiar el valor del número de semilla produce una secuencia diferente de valores aleatorios, que, a su vez, provoca diferentes parámetros y características tanto del conductor como del vehículo (Dowling, Skabardonis, & Alexiadis, 2004).

2.28.3 Calibración del Modelo.

La calibración es el proceso iterativo que permite ajustar los parámetros del modelo para mejorar el rendimiento del sistema dinámico según condiciones de viaje específicos (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019). Es importante mencionar que no existen procedimientos universalmente aceptados para realizar la calibración y validación (CDM Smith, 2015). Se debe tener en cuenta que la variación del rendimiento del sistema de transporte está principalmente determinada por los cambios externos de las condiciones de viaje (variaciones en la demanda de viajes, patrones de incidentes, condiciones climáticas, etc.). El comportamiento del conductor (distancia de seguimiento, aceptación de la brecha y

velocidad máxima objetivo) y otros parámetros del modelo se calibran en cada condición de viaje para crear patrones de congestión consistentes con los datos observados en campo (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019).

Este proceso es necesario debido a que ningún modelo es igual de preciso para todas las posibles condiciones de tráfico. Incluso el modelo de microsimulación más detallado solo contiene una parte de todas las variables que afectan las condiciones del tráfico en el mundo. Dado que ningún modelo puede incluir todo el universo de variables, todos los modelos deben adaptarse a las condiciones locales de circulación y/o tráfico vehicular (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019).

Cada programa de software de micro simulación viene con un conjunto de parámetros ajustables con el fin de calibrar el modelo a las condiciones locales. Por lo tanto, el objetivo de la calibración es encontrar el conjunto de valores de parámetros que mejor represente las medidas observadas en el rendimiento real del sistema. Luego de la calibración se debe revisar los criterios utilizados para verificar que el modelo reproduce con precisión el desempeño del sistema por cada condición de viaje requerida (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019).

Uno de los softwares más utilizados para realizar modelos de microsimulación es VISSIM; el cual, realiza diversos análisis de calibración para poder regular sus parámetros de modelos de comportamiento al comportamiento de conducción observado en diversos países del mundo y este se pueda adaptar a diversas situaciones y circunstancias. Dado que es difícil obtener datos de trayectoria microscópica, la mayoría de estos análisis utilizaron datos macroscópicos proporcionados por la medición transversal estándar, que generalmente son información de volumen y velocidad en intervalos de tiempo cortos. Sin embargo, las pocas calibraciones a nivel microscópico realizadas permitieron evaluar los parámetros de los movimientos de un solo vehículo, como las distintas aceleraciones en cada paso de tiempo (Fellendorf y Vortish, 2010).

2.28.4 Validación de Datos.

La validación es el proceso en el cual se compara, con los parámetros calibrados, el desempeño del tráfico modelado mediante un software con las mediciones realizadas en campo, como volúmenes de tráfico, tiempos de viaje, velocidades promedio y demoras promedio (Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2019).

Este modelado se debe verificar en diferentes condiciones para obtener un alto nivel de confianza y así lograr valores semejantes, con cierto grado de aceptación, entre el software y los resultados de campo, donde se tiene como base los parámetros modificados dentro del software en el proceso de calibración (Benekohal, 1991). Es importante mencionar que los datos aplicados para el proceso de calibración deben ser distinto que los datos utilizados para la validación del modelo (Montenegro & Lozano, 2013).

Figura 16. Esquematización de los procesos de calibración y validación de modelos. Adaptado de “Simulación Microscópica del Tránsito”. por Montenegro & Lozano, 2013.

3 CAPITULO III: METODOLOGÍA

La secuencia de la metodología aplicada en la presente Tesis es la recomendada por la FHWA (2019), la cual, se presenta en la siguiente figura.

Figura 17. Metodología para la elaboración del modelo microscópico del proyecto. Adaptado de “TAT Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software 2019 Update to the 2004 Version”, por Wunderlich, Vasudevan, & Wang, 2017.

El presente trabajo de investigación tiene como principal objetivo optimizar el comportamiento operacional de un intercambio vial a desnivel tipo trébol parcial con cuatro ramales directos mediante la aplicación de la metodología Ramp Metering, utilizando el

algoritmo ALINEA. Este intercambio está conformado por la vía expresa metropolitana Javier Prado y la vía expresa nacional Panamericana. Para optimizar la operación vehicular en el trébol y posteriormente cuantificar los resultados, se optó como herramienta principal, un modelo de micro simulación aplicando el software VISSIM y su modulo VisVAP.

Previo al desarrollo del modelo, se analizó el contexto general con el fin de obtener la información necesaria para tener un conocimiento completo acerca de conceptos esenciales como: definición de vías urbanas, clasificación de las vías, intercambio o intersección vial, confluencias o bifurcaciones viales y tipos de vehículos. También, se obtuvo información sobre el software Vissim, para ello se investigó sobre el modelamiento a nivel microscópico, los parámetros a considerar en el diseño, definición del modelo de seguimiento vehicular de Wiedemann y las variables relacionadas con el flujo y desplazamiento vehicular.

A continuación, se determinó la información dinámica y se utilizó un dron modelo Mavic Pro para obtener los datos de campo correspondientes, como: aforo vehicular (conteos de tráfico clasificados por tipo de vehículos), tiempos de viaje, comportamiento de conductores, interacción entre vehículos, entre otros para conocer los conflictos existentes en las vías que conforman la intersección a desnivel. Posteriormente, se realizó un análisis de riesgos para evaluar la probabilidad y consecuencias de estos. Esto nos permitió cuantificar los riesgos y analizarlos de una manera objetiva.

Figura 18. Dron utilizado modelo Mavic Pro. Fuente: Elaboración Propia.

La primera filmación tuvo como objetivo la calibración del modelo, para ello el horario escogido fue el martes 18 de febrero de 2020 de 6:00 p.m. a 8 p.m. La segunda filmación se realizó para la validación del modelo y se escogió el martes 25 de febrero de 2020 de 6:00 p.m. a 8 p.m. Se eligieron estos días y horario porque presentan la mayor demanda vehicular. Por medio de visitas al trébol se recopiló la información estática necesaria con el fin de identificar la situación de la intersección vial. Para esto, se efectuaron mediciones y así poder obtener información como: distancias y geometría de la intersección, entre otras. De igual forma, se realizó un análisis visual para conocer los conflictos existentes, ubicación de paraderos formales e informales, etc. Las mediciones se realizaron con un distanciómetro láser digital Bosch.

Figura 19. Distanciómetro láser digital Bosch. Fuente: Elaboración propia.

Con las filmaciones realizadas se obtuvo el aforo vehicular, tiempos de viaje en segmentos críticos, tiempos de parada de las líneas de transporte y otras variables requeridas para la modelación. En la siguiente figura se muestra el flujograma del trébol evaluado.

Figura 20. Flujograma del trébol. Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos se realizó el modelado de vías con sus respectivos conectores, de acuerdo con las medidas tomadas en campo. A continuación, se ingresaron las velocidades deseadas en las vías principales y se ubicaron los reductores de velocidad en los lazos del trébol. Posteriormente se ingresó el aforo vehicular, y los flujos relativos de las ramificaciones. Después se colocaron los paraderos de las líneas de transporte. Se asignaron reglas de prioridad y áreas de conflicto para simular el manejo de los conductores. Luego, se variaron los parámetros de comportamiento de conducción de Wiedemann 74.

La información obtenida se clasificó y procesó para generar la información de entrada en el desarrollo del modelo microscópico, mediante la aplicación del software VISSIM, el cual, está conformado por la intersección vial a desnivel, lazos, confluencias, paraderos formales e informales, tipos de vehículos que circulan a través de ella, aforo vehicular y otras consideraciones adicionales con el fin de replicar, lo más cercano a la realidad, el comportamiento observado y analizado en la zona de estudio.

Por consiguiente, se realizó la calibración del modelo con el objetivo de minimizar las diferencias entre el comportamiento observado en el campo y los resultados de la simulación. Esto se realizó con los valores obtenidos de los tiempos de viaje en los segmentos críticos de una muestra aleatoria de vehículos. Se determinó que el número de semillas que se ajusta al caso fue de 40, con un incremento de 1, en 25 corridas. Los valores obtenidos tanto en el modelo, como en la situación real se compararon con una prueba estadística no paramétrica

de diferencia de medias, con un 95% de confianza. En la cual, se efectuaron 10000 permutaciones con las mediciones de tiempos de viaje, utilizando el software Vissim.

Finalmente, con el modelo construido, calibrado y validado, se realizó la programación de los semáforos dinámicos, programando el algoritmo ALINEA mediante el módulo VisVAP, verificando su correcto funcionamiento. Por último, para cada lazo se colocó el sistema semafórico con los parámetros adaptados en cada caso se ubicaron tres tipos de detectores por lazo: proximidad, porcentaje de ocupación y demanda, evaluando los parámetros de eficiencia de acuerdo con los requerimientos de las vías, ya que cada uno presenta una situación distinta tanto en la demanda de los lazos como en la demanda de la vía principal. Por último, se desarrollaron las conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

Figura 21. Diagrama estrategia ALINEA aplicado en un intercambio a desnivel tipo trébol. Fuente: Elaboración propia.

4 CAPITULO IV: ANALISIS DEL CASO DE ESTUDIO

4.1 Área de estudio del caso

El intercambio vial a desnivel está comprendido entre dos avenidas principales, dicha infraestructura es de tipo trébol parcial de tres lazos y cuatro carriles colectores. Para la investigación se evaluaron los lazos simultáneamente debido a la congestión vehicular observada, y a las colas que se formaban en los lazos. Dichos lazos son a desnivel y poseen vías de un solo carril, los cuales confluyen hacia las vías principales. Las avenidas que la conforman son la Javier Prado la cual cuenta con 4 carriles por sentido, y la Panamericana Sur, que está conformada por tres carriles para ambos sentidos. Tal como se muestra en la figura siguiente:

Figura 22. Área de estudio del caso. Fuente: Elaboración Propia.

El aforo vehicular se realizó considerando la base de datos del sitio web TomTom la cual recopila información del tráfico en tiempo real. En la siguiente figura se puede observar un mayor flujo vehicular durante la noche. Es por esta razón que se eligió la hora pico nocturna para el conteo vehicular.

Figura 23. Congestión Vehicular Lima, por TomTom (2019).

4.2 Análisis de riesgos en el área de estudio

Se realizó un análisis de riesgo en el área de estudio para detectar situaciones peligrosas y en consecuencia establecer prioridades para su control y/o eliminación. Para realizar este análisis de una manera objetiva se tuvo que cuantificar la probabilidad y consecuencia de los riesgos. Las filmaciones, visitas al trébol y la metodología recomendada por la Norma Técnica de Prevención 330 de España “Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente”, nos permitió cuantificar y jerarquizar la magnitud de los riesgos existentes según su prioridad de corrección. Inicialmente, se detectaron las deficiencias en el comportamiento operacional e interrupciones en el flujo vehicular del trébol. Luego, se estimó la probabilidad de ocurrencia de un accidente con la finalidad de obtener valores cuantificables. Finalmente, las deficiencias detectadas fueron asociadas a los riesgos identificados. A continuación, se presentan las cuatro situaciones de conflicto identificadas en el trébol con su respectivo análisis de riesgo:

Para el primer caso, se observa un ingreso desordenado y peligroso de vehículos desde los lazos del trébol hacia la vía principal. La falta de un control de ingreso en el trébol puede provocar que los vehículos ubicados en los lazos realicen maniobras temerarias para poder ingresar a la vía principal poniendo en peligro a los vehículos que transitan en esta.

Figura 24. Vehículos del lazo ingresando a la vía principal. Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Desorden provocado por el ingreso desordenado de los vehículos. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis de riesgo, para el primer caso se obtuvo un nivel de deficiencia alto con un valor de 6. Esto quiere decir que se identificó una moderada eficacia de las medidas preventivas existentes. Además, se determinó un nivel de exposición frecuente; es decir, que la situación se presenta varias veces durante el día por tiempos cortos. El nivel de probabilidad se calculó mediante la multiplicación de ambos factores, obteniendo como resultado un valor de 18; lo que indica que el riesgo puede suceder una o más veces por mes o año. Según lo analizado, al nivel de consecuencia se le asignó un valor de 25; lo que significa un nivel moderado que, en caso de materializarse el riesgo, podrían ocasionar accidentes y heridos. Finalmente, mediante el producto del nivel de probabilidad y nivel de consecuencia se obtuvo un nivel de riesgo nivel II, que resulta un riesgo alto para vehículos; en el cual, se debe de corregir o reducir la probabilidad de ocurrencia incluso a un alto costo. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 2. Resultados del análisis de riesgo para el primer caso.

Caso 1	Video	2	Min:	12:02	
Nivel de Deficiencia		ND	6	Alto	
Nivel de Exposición		NE	3	Frecuente	
Nivel de Probabilidad	ND*NE	NP	18	Ocasional	
Nivel de Consecuencias		NC	25	Moderado	
Nivel de Riesgo	NP*NC	NR	450	Nivel de Riesgo II	Alto

Para el segundo caso, se identificó una alta demanda vehicular sin un control semafórico, esta falta de control genera que los vehículos de los lazos se vean obligados a realizar

peligrosas maniobras con el fin de poder ingresar a la vía principal; lo cual, genera mayor caos vehicular, la formación de largas colas en los lazos del trébol y el probable incremento de accidentes en los lazos y en la vía principal que conforman el trébol.

Figura 26. Alta demanda vehicular sin control semafórico identificada en las vías que componen el trébol.
Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis de riesgo realizado, se obtuvieron los mismos valores presentes que en el primer caso. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 3. Resultados del análisis de riesgo para el segundo caso.

Caso 2	Video	1	Min:	07:59	
Nivel de Deficiencia		ND	6	Alto	
Nivel de Exposición		NE	3	Frecuente	
Nivel de Probabilidad	ND*NE	NP	18	Ocasional	
Nivel de Consecuencias		NC	25	Moderado	
Nivel de Riesgo	NP*NC	NR	450	Nivel de Riesgo II	Alto

En el tercer caso, se pudo notar, al momento de ingresar a las vías principales, una inadecuada dosificación vehicular en cada lazo del trébol; el cual, ocasiona una disminución de la velocidad en las vías principales y que el flujo vehicular en todo el trébol sufra una ralentización. Esto puede provocar colisiones leves a moderadas, debido a que los vehículos constantemente se detienen y posteriormente aceleran para poder ingresar a la vía principal.

Figura 27. Ausencia de dosificación vehicular generando una ralentización general. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis de riesgo realizado, para el tercer caso se obtuvo un nivel de deficiencia muy alto con un valor de 10. Esto quiere decir que los hallazgos identificados pueden dar lugar a accidentes de tránsito con víctimas fatales y que presenta una inexistente eficacia del conjunto de medidas preventivas respecto al riesgo. De igual manera, se determinó un nivel de exposición frecuente; es decir, que la situación se presenta varias veces durante el día por tiempos cortos. El nivel de probabilidad se calculó mediante la multiplicación de los factores antes mencionados, obteniendo como resultado un valor de 30; lo que indica que el riesgo se puede materializar con frecuencia (más de una vez por día o semana). Según lo analizado, al nivel de consecuencia se le asignó un valor de 10. Esto significa un nivel leve que pueden existir probables daños materiales. Finalmente, mediante el producto del nivel de probabilidad y nivel de consecuencia se obtuvo un nivel de riesgo nivel II, que resulta un riesgo alto para vehículos; en el cual, se debe de corregir o reducir la probabilidad de ocurrencia incluso a un alto costo. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 4. Resultados del análisis de riesgo para el tercer caso.

Caso 3	Video	1	Min:	05:54	
Nivel de Deficiencia		ND	10	Muy alto	
Nivel de Exposición		NE	3	Frecuente	
Nivel de Probabilidad	ND*NE	NP	30	Probable	
Nivel de Consecuencias		NC	10	Leve	
Nivel de Riesgo	NP*NC	NR	300	Nivel de Riesgo II	Alto

En cuarto lugar, al momento del levantamiento de información se observó que algunos de los vehículos cambian intempestivamente de carril luego de ingresar a la vía principal. Esta es una acción recurrente en el trébol, ya que los conductores no tienen un orden establecido para ingresar a la vía principal desde los lazos confluyentes. La invasión de las vías adyacentes puede ocasionar colisiones en cadena, lo que provocaría probables afectaciones humanas, vehiculares y posibles muertes.

Figura 28. Ingreso intempestivo de un vehículo a una de las vías principales. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el análisis de riesgo realizado, el cuarto caso es el que presenta el mayor riesgo. Para este caso, se obtuvo un nivel de deficiencia muy alto con un valor de 10. Al igual que el caso anterior, este valor quiere decir que los hallazgos identificados pueden dar lugar a accidentes de tránsito con víctimas fatales y que presenta una inexistente eficacia del conjunto de medidas preventivas respecto al riesgo. De igual manera, se determinó un nivel de exposición frecuente; es decir, que la situación se presenta varias veces durante el día por tiempos cortos. El nivel de probabilidad se calculó mediante la multiplicación de los factores antes mencionados, obteniendo como resultado el valor de 30; lo que indica que el riesgo se puede materializar con frecuencia (más de una vez por día o semana). Según lo analizado, presenta un nivel de consecuencia moderado, cuyo un valor es de 10. Esto significa que pueden existir probables heridos adicional a los daños materiales ocasionados por un accidente. Finalmente, mediante el producto del nivel de probabilidad y nivel de consecuencia se obtuvo un nivel de riesgo nivel I, que resulta un riesgo intolerable para

vehículos. Por lo tanto, se recomienda que sea corregido incluso a un alto costo. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 5. Resultados del análisis de riesgo para el cuarto caso.

Caso 4	Video:	1	Min:	05:13	
Nivel de Deficiencia		ND	10	Muy alto	
Nivel de Exposición		NE	3	Frecuente	
Nivel de Probabilidad	ND*NE	NP	30	Probable	
Nivel de Consecuencias		NC	25	Moderado	
Nivel de Riesgo	NP*NC	NR	750	Nivel de Riesgo I	Intolerable

Finalmente, luego de realizar los análisis de riesgos respectivos y analizar la situación mediante una inspección de campo, se llegó a la conclusión que se debe solucionar lo identificado incluso si el costo es elevado, debido a que se considera el caso más crítico para aplicar la metodología Ramp metering; en donde, en nuestra investigación, resulto ser el cuarto caso; el cual, presenta un nivel de riesgo intolerable.

5 CAPITULO V: MICROSIMULACIÓN DEL TRÉBOL

En este capítulo se desarrolla la construcción, calibración y validación del modelo, mediante la aplicación del programa Vissim. En primer lugar, para la construcción del modelo vehicular la información recopilada se trasladó al programa Vissim, con el objetivo de llevar a cabo la microsimulación. En segundo lugar, la calibración del modelo consistió en verificar que los datos de entrada sean los correctos y que la simulación refleje la realidad observada en campo; para esto, se compararon los datos documentados con la información obtenida en el software. Finalmente, en la validación se realizó el mismo procedimiento que el utilizado para la calibración, con la diferencia de que los datos de entrada fueron obtenidos en días distintos, observando un comportamiento vehicular similar. A continuación, se explica con mayor detalle lo antes mencionado.

5.1 Modelo vehicular (Vissim)

Para realizar la construcción del modelo se trabajó con un plano en AutoCAD del trébol estudiado, el cual se obtuvo de la municipalidad respectiva. Los datos de campo, y los parámetros de VISSIM serán descritos a continuación:

5.1.1 Importación a escala de la intersección (Vissim)

Para la definición de la geometría se utilizó el plano de arquitectura del trébol de la vía expresa metropolitana Javier Prado y la vía expresa nacional Panamericana donde detalla la intersección y las dimensiones de ambas vías, se procede a importar al programa VISSIM (*Background Images*). Posteriormente, se escala para que tenga las medidas reales (longitud en metros), luego se presiona Control y clic derecho en la pantalla y se selecciona el comando *Set Scale*.

Debido a que se conocen los anchos de los carriles, se delimita el tramo y se coloca la verdadera magnitud de este. Una vez que la imagen de fondo se encuentre escalada es recomendable bloquear su movimiento, dando un clic sobre el candado a la izquierda de la herramienta *Background Images*.

Figura 29. Importación y escala de la imagen al VISSIM. Fuente: Elaboración Propia.

5.1.2 Criterios de diseño geométrico de la propuesta en la zona de estudio

Las características geométricas de la zona de estudio se obtuvieron de dos fuentes. La primera, obtenida de una filmación realizada en campo utilizando un dron. La segunda, de mediciones tomadas en campo, las cuales se ingresaron al programa Vissim

La formulación del modelo considera restricciones para lograr su funcionabilidad como el cambio de carril, antes de la confluencia. La Av. Javier prado consta de 6 carriles, 3 en dirección Sur- Norte y 3 en dirección Norte- Sur, en cada dirección se utilizaron 2 detectores de ocupación, y 1 detector de movimiento en cada lazo. De igual manera la Av. Panamericana, consta de 6 carriles, 3 en dirección Este- Oeste y 3 en dirección Oeste- Este, con la misma configuración de detectores. Ambas estarán en función de las señales de tránsito.

5.1.3 Creación de vías y conectores

Como siguiente paso se representan los carriles vehiculares mediante el uso de links y conectores. Para ello, se selecciona la herramienta Links y se dibujan las vías que contempla la intersección en estudio, conforme al sentido de viaje, luego se le asigna el número de carriles y el ancho de cada uno de estos de acuerdo con la tabla 2. Se

finaliza con conectar las vías creadas mediante el arrastre con clic derecho desde el final del carril de origen hasta el inicio del carril de destino.

En el siguiente paso se procedió a modelar los carriles vehiculares en ambas vías sobre el plano. se selecciona la opción *Links* y con el clic derecho en la pantalla se colocan las vías, estas con sus respectivos anchos de carril. Finalmente, para conectar dichas vías y proponer los giros correspondientes, se unen los carriles con clic derecho para luego ingresar los números aleatorios y así generar una curva aceptable que quede acorde a la geometría de la intersección con la escala deseada.

Figura 30. Vía principal, lazo y conector. Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Flujo vehicular total

Se ingresa la cantidad total del conteo de los vehículos que se obtuvo del trabajo de campo, con referencia a la primera filmación. Para ello utilizamos la herramienta de *Vehicle Inputs* /clic derecho/ *Show List* y se ingresa la data.

Figura 31. Ruta de ingreso del flujo vehicular. Fuente: Elaboración propia.

Count: 4	No	Name	Link	Volume(0)	VehComp(0)
1	1		2: JP E-O	4662.0	3: JP E-O
2	2		1: JP O-E	4440.0	4: JP O-E
3	3		3: PAN N-S	3348.0	1: PANAM N-S
4	4		8: PAN S-N	3420.0	2: PANAM S-N

Figura 32. Cantidad de vehículos en las vías. Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Composición vehicular

En esta sección se ingresan las relaciones entre los distintos tipos de vehículos para que el programa pueda distribuirlos, según lo obtenido en el procesamiento de los datos de campo. Estos datos se ingresan mediante la opción *Vehicle Compositions* ubicado en la opción *Traffic*. Se le puede asignar un nombre a cada entrada y adicionar los tipos de vehículos presentes con su respectivo porcentaje y velocidad. A continuación, se ve el detalle de la vía expresa Panamericana y de la vía expresa Javier Prado.

Cou...	No	Name	Count: 3	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	1	PANAM N-S	1	100: Car	1050: PANAM N-S	0.780
2	2	PANAM S-N	2	200: HGV	1050: PANAM N-S	0.140
3	3	JP E-O	3	300: Bus	1050: PANAM N-S	0.080
4	4	JP O-E				

Figura 33. Flujos relativos en el sentido panamericana Norte a Sur. Fuente: Elaboración propia.

Cou...	No	Name	Count: 3	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	1	PANAM N-S	1	100: Car	1049: PANAM S-N	0.830
2	2	PANAM S-N	2	200: HGV	1049: PANAM S-N	0.110
3	3	JP E-O	3	300: Bus	1049: PANAM S-N	0.060
4	4	JP O-E				

Figura 34. Flujos relativos en el sentido panamericana Sur a Norte. Fuente: Elaboración propia.

Cou...	No	Name	Count: 3	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	1	PANAM N-S	1	100: Car	1048: JP E-O	0.970
2	2	PANAM S-N	2	200: HGV	1048: JP E-O	0.010
3	3	JP E-O	3	300: Bus	1048: JP E-O	0.020
4	4	JP O-E				

Figura 35. Flujos relativos en el sentido Javier prado Este a Oeste. Fuente: Elaboración propia.

Cou...	No	Name	Count: 2	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	1	PANAM N-S	1	100: Car	1047: JP O-E	0.960
2	2	PANAM S-N	2	200: HGV	1047: JP O-E	0.010
3	3	JP E-O				
4	4	JP O-E				

Figura 36. Flujos relativos en el sentido Javier prado Oeste a Este. Fuente: Elaboración propia.

5.1.6 Velocidad deseada

En el caso de estudio se procedió a obtener la gráfica de la velocidad deseada para que el modelo se adapte a la realidad. Para esto se tomaron datos de 25 vehículos en cada sentido de cada vía. De estos datos se realizó cálculos estadísticos para poder obtener la gráfica de las frecuencias relativas acumuladas versus la velocidad en Km/h de la muestra. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se realizó el procedimiento de los datos obtenidos; en el caso de la avenida Javier prado con dirección Oeste a Este se utilizó una distancia de 156.2m.

Tabla 5. Distribución de velocidades en la vía expresa Javier Prado Oeste a Este.

JAVIER PRADO OESTE - ESTE				
Número de muestra	Tiempo (seg.)	Distancia (m.)	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	12.62	156.2	12.4	44.6
2	13.87	156.2	11.3	40.5
3	11.45	156.2	13.6	49.1
4	9.69	156.2	16.1	58.0
5	9.42	156.2	16.6	59.7
6	11.92	156.2	13.1	47.2
7	11.84	156.2	13.2	47.5
8	12.04	156.2	13.0	46.7
9	11.79	156.2	13.2	47.7
10	13.68	156.2	11.4	41.1
11	11.51	156.2	13.6	48.9
12	12.05	156.2	13.0	46.7
13	11.31	156.2	13.8	49.7
14	12.38	156.2	12.6	45.4
15	13.28	156.2	11.8	42.3
16	10.27	156.2	15.2	54.8
17	11.59	156.2	13.5	48.5
18	16.06	156.2	9.7	35.0
19	8.9	156.2	17.6	63.2
20	8.91	156.2	17.5	63.1
21	9.48	156.2	16.5	59.3
22	11.44	156.2	13.7	49.2
23	10.39	156.2	15.0	54.1
24	11.57	156.2	13.5	48.6
25	12.42	156.2	12.6	45.3

Tabla 6. Se muestra la velocidad en Km/h y las frecuencias relativas acumuladas.

conteo de frecuencias							
Número de intervalo	intervalo velocidades en m/s		f	F	h	H	Velocidad Km/h
1	9.7	10.8	1	1	0.04	0.0	39.0
2	10.8	11.9	3	4	0.12	0.2	42.9
3	11.9	13.0	5	9	0.2	0.4	46.9
4	13.0	14.1	9	18	0.36	0.7	50.9
5	14.1	15.2	2	20	0.08	0.8	54.8
6	15.2	16.3	1	21	0.04	0.8	58.8
7	16.3	17.4	2	23	0.08	0.9	62.7
8	17.4	18.5	2	25	0.08	1.0	66.7

Posteriormente estas relaciones entre la frecuencia relativa acumulada y las velocidades se ingresan al VISSIM, y se obtiene la gráfica que se muestra a continuación, este procedimiento se realizó tanto para la vía expresa Panamericana como para la vía expresa Javier Prado.

Figura 37. Distribución de la velocidad deseada en la dirección Javier Prado Oeste a Este. Elaboración propia.

5.1.7 Definición de rutas vehiculares:

Luego de que se ingresen los aforos vehiculares correspondientes, se distribuyen los flujos entre todas las posibles rutas y direcciones a recorrer. Para el desplazamiento vehicular, según el aforo obtenido, se determina el porcentaje de vehículos que se reparten desde una vía en común.

En Vissim, las rutas vehiculares se crean con el uso de la herramienta *Vehicle Routes*, para lo cual se selecciona la opción *Static*, y con el clic derecho del ratón se comienza a trazar las rutas como se ve puede ver en la figura a continuación.

Cou...	No	Name	Link	Pos	AllVehTypes	VehClasses	Count: 2	VehRoutDec	No	Name	DestLink	DestPos	RelFlow(0)
1	1	JP E-O	2: JP E-O	57.000	☒		1	7: PAN S-N...	2	Pana...	12	280.265	0.773
2	4	PAN S-N	8: PAN S-N	0.349	☒		2	7: PAN S-N...	3	lazo...	20: JP E...	134.387	0.227
3	5	PAN N-S	3: PAN N-S	20.483	☒								
4	6	JP O-E	1: JP O-E	61.011	☒								
5	7	PAN S-N al trebol	9	122.583	☒								
6	8	LAZO SE	10010	95.824	☒								
7	9	RUTA BUSES JP E-...	10016	23.054	☒								
8	10	RUTA BUSES P S-N	10014	17.163	☒								

Figura 38. Flujo relativo en la Av. Panamericana Sur a Norte. Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Vista espacial de la distribución del flujo relativo en la Av. Panamericana Sur a Norte. Fuente: Elaboración propia.

5.1.8 Solución áreas de conflicto

El último paso para el desarrollo del modelo es establecer reglas de prioridad entre vehículos ubicados en las áreas de conflicto. Por ejemplo, los vehículos que se desplazan en los lazos, al momento de ingresar a la vía principal tienden a generar conflictos con los vehículos que transitan en las vías principales, provocando errores durante la simulación. Debido a esto, en la modelación se utilizan dos herramientas para salvar estas zonas, las cuales son: *Priority Rules* y *Conflict Areas*. De acuerdo con lo observado luego de la obtención de datos en campo.

La herramienta *Conflict Areas* se utiliza cuando en un área de conflicto los vehículos que se desplazan en una vía usualmente deben esperar a los vehículos que transitan en la otra vía para continuar con su recorrido. Esta herramienta resalta de color amarillo todas las zonas

en conflicto presentes en el núcleo de la intersección. Además, sirve para seleccionar la vía que restringirá su desplazamiento cuando existan vehículos en el área de conflicto. Para modificar las prioridades se presiona clic derecho hasta que se pinte de verde la vía que tendrá preferencia sobre la otra que se resalte de color rojo.

Figura 40. Área de conflicto con un estado activo y un estado pasivo, debido a la situación observada.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la herramienta *Priority Rules* se utiliza cuando no se puede identificar con claridad la preferencia de pase, y en lugar de ello, estas prioridades de paso dependen de la distancia entre los vehículos y la zona de conflicto. Las áreas que quedan resaltadas de color amarillo son reguladas utilizando esta herramienta. Para ello, se hace clic derecho para que los vehículos de la vía seleccionada se detengan, luego, el segundo clic derecho sirve para marcar el área por la que los otros vehículos se deben desplazar y así puedan continuar su trayecto.

Figura 41. Reglas de prioridad de un lazo ingresando a la vía principal. Fuente: Elaboración propia.

5.1.9 Creación de señales de control

El área de estudio se trata de una intersección a desnivel tipo trébol, no semaforizada. Para la propuesta, se utilizaron semáforos dinámicos aplicando la metodología Ramp metering. Estos se programaron mediante el módulo VisVAP, que pertenece al programa VISSIM. Para esto, no se requirió ingresar el tiempo de ciclo en cada fase; ya que, este ciclo se calcula automáticamente de acuerdo con los datos obtenidos, en tiempo real, por los detectores de proximidad y porcentaje de ocupación.

De igual manera, no es necesario asignar fases semafóricas ya que esta lógica automatiza la respuesta del semáforo. Para poder observar los semáforos físicos en los lazos del trébol, se hace uso de la herramienta 3d Traffic Signals; para ello se da clic derecho, se ubica los postes semafóricos y, finalmente, en el cuadro de diálogo que se genera, se editan las características de la señal.

Figura 42. Creación de señalización semafórica. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Calibración del modelo vehicular

5.2.1 Parámetros de Eficiencia vehicular

En esta investigación se evalúa el parámetro de eficiencia para cada una de las direcciones de las autopistas. El parámetro que se evaluó fue el tiempo de viaje de los vehículos, para ello se ingresó a la herramienta de Vehicle Travel Time y haciendo clic derecho se procedió a ubicar el punto inicial y el punto final del recorrido a analizar. Luego se definió la distancia exacta, la cual fue ingresada según los datos obtenidos en campo.

5.2.2 Parámetros de simulación vehicular

Para el caso de estudio se consideraron los siguientes parámetros: número semilla (*Random Seed*), el número de corridas (*Number of Runs*), el incremento del número semilla (*Random Seed Increment*) y la velocidad de simulación (*Simulation Speed*).

Se utilizó como número semilla el que aparece por defecto en el programa. Este número tiene un valor de 42 con un incremento de 1 por cada corrida. La velocidad de simulación fue la máxima. Para determinar el número de corridas se utilizó la ecuación de t-student, la cual determinó que se deben utilizar 15 corridas para simular el modelo, este es un valor aceptable con un 95% de confianza.

Para ingresar los parámetros descritos líneas arriba, se debe seguir la siguiente ruta: *Simulation/Parameters*. Los parámetros que se utilizaron en la simulación se muestran a continuación en la siguiente figura.

Simulation parameters

General Meso

Comment:

Period: Simulation seconds

Start time:

Start date:

Simulation resolution: Time step(s) / simulation second

Random Seed:

Number of runs:

Random seed increment:

Dynamic assignment volume increment:

Simulation speed: ☒ Factor:
☐ Maximum

☐ Retrospective synchronization

☐ Break at: Simulation seconds

Number of cores:

OK Cancel

Figura 43. Parámetros de simulación. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Resultados de los vehículos

Como ya se mencionó, se utilizó el parámetro de eficiencia *Vehicle Travel Time* para la calibración del modelo en la situación real debido a que estos fueron los datos obtenidos del trabajo de campo.

El periodo considerado para para la estabilización del programa (*warm up*) fue de 600 segundos. Además, se establecieron 3600 segundos como tiempo total de micro simulación, ya que la filmación se realizó durante 1 hora.

El ingreso de los datos al software se realiza siguiendo la siguiente ruta: *Evaluation / Configuration*, luego se selecciona la opción de *Vehicle Travel Time* y finalmente se coloca el intervalo de tiempo a evaluar:

Figura 44. Se establece el tiempo de estabilización (warm up) y el intervalo de tiempo a simular. Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Parámetros del comportamiento del conductor

Debido a que el caso de estudio se encuentra en una zona urbana se consideraron los parámetros de Wiedemann 74 para realizar esta investigación. Con el uso de estos parámetros se realizó la calibración del modelo, con el fin de adecuarlo a la situación real. Para conseguir un resultado óptimo el programa se tuvo que realizar múltiples simulaciones y se cambiaron los parámetros de Wiedemann 74 para cada caso. Los valores que más se ajustaron con la realidad fueron los siguientes:

Tabla 7. Valores de los parámetros de Wiedemann 74, y media de los tiempos de viaje del trébol.

ax	bx_add	bx_mult	X(seg)
1	1	0.5	30.4

Es importante mencionar que los valores varían a medida que se cambian los parámetros, los resultados irán variando. Es por ello por lo que las corridas se realizaron múltiples veces.

Finalmente, se realizará un análisis estadístico mediante una prueba no paramétrica de hipótesis nula de igualdad de medias para verificar que el modelo represente correctamente la realidad. Con esta prueba se obtuvo un 95% del nivel de confianza.

Los parámetros del comportamiento de los conductores son ingresados siguiendo la siguiente ruta *Base Data / Driving Behavior*. A continuación, se muestra la ventana donde se ingresan los parámetros de Wiedemann 74.

Figura 45. Parámetros de comportamiento de los conductores. Fuente: Elaboración propia.

5.2.5 Evaluación del número de corridas

Para la determinación del número de corridas que se deben realizar en la calibración del modelo se utilizó la ecuación t-student. El programa se corrió 25 veces, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados: tiempos de viaje para cada tramo estudiado, promedio de los tiempos (X), la desviación estándar (S) y número de la muestra (N). Los resultados de cada tramo se muestran a continuación:

Tabla 8. Número de corridas en la Av. Javier Prado Este- Oeste. Fuente: Elaboración propia.

JAVIER PRADO ESTE-OESTE					
Número de corridas					
X real	7.14	S real	1.51	N real	100
X corridas	7.46	S corridas	0.03	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	0.75	t (alpha/2)	2.145
N >=	0.01				

Tabla 9. Número de corridas en la Av. Javier Prado Oeste- Este. Fuente: Elaboración propia.

JAVIER PRADO OESTE- ESTE					
Número de corridas					
X real	11.60	S real	1.66	N real	100
X corridas	12.15	S corridas	0.10	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	1.21	t (alpha/2)	2.145
N >=	0.03				

Tabla 10. Número de corridas en la Av. Panamericana Sur- Norte. Fuente: Elaboración propia.

PANAMERICANA SUR-NORTE					
Número de corridas					
X real	5.48	S real	1.54	N real	50
X corridas	5.91	S corridas	0.10	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	0.59	t (alpha/2)	2.145
N >=	0.13				

Tabla 11. Número de corridas en la Av. Panamericana Norte- Sur. Fuente: Elaboración propia.

PANAMERICANA NORTE-SUR					
Número de corridas					
X real	4.16	S real	0.75	N real	50
X corridas	4.97	S corridas	0.25	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	0.50	t (alpha/2)	2.145
N >=	1.20				

Se concluye que, en todos los casos, el número de corridas efectuado es mayor al número de corridas necesario. Por lo tanto, 25 corridas serán suficientes para calibrar el modelo.

5.2.6 Comprobación de la calibración de vehículos mediante la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias.

En esta etapa se validan los datos levantados en campo al contrastarlos con los resultados obtenidos de la simulación del programa, esto mediante una prueba de hipótesis nula de igualdad de medias. Para esto, luego de realizar las corridas correspondientes, se obtuvieron 25 valores de tiempos de viaje de los vehículos para cada vía analizada. Dichos valores se agruparon y posteriormente se compararon con los datos obtenidos en campo. A continuación, se procedió a realizar un análisis estadístico, utilizando, tal como se mencionó anteriormente, una prueba de hipótesis nula de igualdad de medias. La cual fue evaluada con un nivel de confianza del 95%, aplicando una prueba no paramétrica con el software *Randomization Test*.

En nuestro caso de estudio se evaluó las vías expresas Javier Prado y Panamericana, en ambos sentidos: Oeste a Este, Este a Oeste, Norte a Sur y Sur a Norte, respectivamente.

En primer lugar, se analizó la vía expresa Javier Prado Oeste a Este. Se utilizaron 25 datos de campo, obteniendo un promedio de 11.6 seg. Por otro lado, mediante el uso del software

Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 12.15 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.89 a 0.869 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de 0.54, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 46. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Oeste a Este (calibración). Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, se analizó la vía expresa Javier Prado Este a Oeste. Se utilizaron la misma cantidad de datos que en el sentido anterior, obteniendo un promedio de 7.14 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 7.46 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.741 a 0.804 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de 0.33, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 47. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Este a Oeste (calibración). Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, se analizó la vía expresa Panamericana Sur a Norte. De igual manera se utilizaron un total de 25 datos de campo, obteniendo un promedio de 5.48 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 5.91 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.787 a 0.831 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de 0.43, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 48. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Sur a Norte (calibración). Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se analizó la vía expresa Panamericana Norte a Sur. De igual manera se utilizaron un total de 25 datos de campo, obteniendo un promedio de 4.16 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 4.97 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.445 a 0.462 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de 0.4, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 49. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Norte a Sur (calibración). Fuente: Elaboración propia.

Por último, se puede verificar que ambas vías expresas cumplen con el análisis estadístico, y que el modelo se encuentra correctamente calibrado con los parámetros de Wiedemann $ax=1$, $bx_add=1$, $bx_mult=0.5$.

5.3 Validación del modelo vehicular

Luego de tener el modelo calibrado, se procede a realizar la validación, para ello se evalúa el comportamiento vehicular. En este procedimiento se ingresan nuevos datos de entrada en el modelo del diseño actual. De igual forma que en la calibración, se utilizaron los parámetros de Wiedemann 74 para ajustar los desplazamientos y el comportamiento de los vehículos. Además, el software se corrió nuevamente un total de 25 veces, esto con el fin de

obtener resultados confiables. A continuación, se presentan las tablas que verifican el valor adecuado para la cantidad de corridas.

Tabla 12. *Número de corridas en la Av. Javier Prado Este- Oeste. (validación).*

JAVIER PRADO ESTE-OESTE					
Número de corridas					
X real	7.33	S real	1.39	N real	100
X corridas	7.52	S corridas	0.02	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	0.75	t (alpha/2)	2.145
N >=	0.01				

Tabla 13. *Número de corridas en la Av. Javier Prado Oeste- Este. (validación).*

JAVIER PRADO OESTE- ESTE					
Número de corridas					
X real	12.59	S real	2.86	N real	100
X corridas	12.20	S corridas	0.08	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	1.22	t (alpha/2)	2.145
N >=	0.02				

Tabla 14. *Número de corridas en la Av. Panamericana Sur- Norte. (validación).*

PANAMERICANA SUR-NORTE					
Número de corridas					
X real	6.43	S real	1.75	N real	50
X corridas	6.01	S corridas	0.44	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	0.60	t (alpha/2)	2.145
N >=	2.47				

Tabla 15. *Número de corridas en la Av. Panamericana Norte- Sur. (validación).*

PANAMERICANA NORTE-SUR					
Número de corridas					
X real	4.88	S real	1.36	N real	50
X corridas	4.85	S corridas	0.17	N corridas	25
nivel confianza (%)	95	Margen de error	0.49	t (alpha/2)	2.145
N >=	0.54				

De los resultados obtenidos de los cálculos estadísticos se concluye que con las 25 corridas es suficiente para la evaluación del modelo.

5.3.1 Comprobación de la validación de vehículos mediante la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias.

Para validar el modelo se levantan nuevos datos en campo con la ayuda de una nueva filmación, y luego estos son contrastados con los resultados obtenidos en la simulación del programa, esto mediante una prueba de hipótesis nula de igualdad de medias. Para ello, se realizaron las corridas correspondientes, obteniendo un total de 25 valores de tiempos de viaje de los vehículos para cada vía analizada. A continuación, se procedió a realizar un análisis estadístico, utilizando, tal como se mencionó anteriormente, una prueba de hipótesis nula de igualdad de medias. La cual fue evaluada con un nivel de confianza del 95%, aplicando una prueba no paramétrica con el software *Randomization Test*.

En esta investigación se evaluó las vías expresas Javier Prado y Panamericana, en ambos sentidos: Oeste a Este, Este a Oeste, Norte a Sur y Sur a Norte, respectivamente.

En primer lugar, se procedió a analizar la vía expresa Javier Prado Oeste a Este. Para esto, se utilizaron 25 datos de campo, obteniendo un promedio de 12.59 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 12.20 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -1.038 a 1.047 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de -0.4, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 50. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Oeste a Este (validación). Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, se analizó la vía expresa Javier Prado Este a Oeste. Se utilizaron la misma cantidad de datos que en el sentido anterior, obteniendo un promedio de 7.33 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 7.52 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.558 a 0.555 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de 0.19, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 51. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Javier Prado Este a Oeste (validación). Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, se analizó la vía expresa Panamericana Sur a Norte. De igual manera se utilizaron un total de 25 datos de campo, obteniendo un promedio de 6.43 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 6.01 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.721 a 0.709 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de -0.41, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 52. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Sur a Norte (validación). Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se analizó la vía expresa Panamericana Norte a Sur. De igual manera se utilizaron un total de 25 datos de campo, obteniendo un promedio de 4.88 seg. Por otro lado, mediante el uso del software Vissim, se obtuvieron 25 datos, con un promedio de 4.85 seg. Con los valores ingresados al programa *Randomization Test* se obtuvo un rango de -0.53 a 0.536 con una diferencia de medias de tiempo de viaje de -0.04, obteniendo un 95% de confiabilidad utilizando la prueba de *Two Tails*, tal como se muestra en la siguiente figura. Dicho valor se encuentra en la “zona de no rechazo”; es decir, que se encuentra dentro del rango admisible, demostrando que la prueba de hipótesis nula de igualdad de medias se cumple.

Figura 53. Prueba de hipótesis nula de los tiempos de viaje vehicular correspondientes a la vía Panamericana Norte a Sur (validación). Fuente: Elaboración propia.

Con esto se puede verificar que ambas vías expresas, que conforman el trébol, cumplen con el análisis estadístico, y que el modelo se encuentra correctamente validado con los parámetros de Wiedemann $ax=1$, $bx_add=1$, $bx_mult=0.5$.

6 CAPITULO VI: RESULTADOS Y PROPUESTA SEMAFÓRICA

En este capítulo, se presenta un resumen del análisis de riesgo realizado para cada uno de los cuatro casos identificados. De igual manera, se muestran los resultados finales obtenidos en las simulaciones. Además, se realiza una comparativa de valores entre la situación real y la propuesta.

En primer lugar, la siguiente figura presenta el análisis de riesgo realizado para el primer caso. Se puede observar que presenta un nivel de riesgo Alto y se recomienda corregir lo identificado incluso a un alto costo.

IDENTIFICACIÓN DEL HALLAZGO - CASO I						
Ficha No.	AR-003	Fecha de creación:	15	Enero	2020	
Departamento:	Lima	Distritos:	San Borja - Surco			
Zona:	Urbana	Categoría de la vía:	Vía Expresa Nacional/Regional			
Nombre de la vía:	Panamericana					
Sentido:	Dos sentidos					
Hallazgo identificado:	Vehículos ingresan de forma peligrosa hacia la vía principal del trébol.					
Aspecto general:	Usuarios Vulnerables					
Aspecto específico:	Vehículos					
Autor:	Cutipa, John y Lozano, Edson					
ANÁLISIS DE RIESGO						
Descripción del hallazgo:	Se identificó que los vehículos realizan maniobras temerarias para poder ingresar a la vía principal desde los lazos de trébol, poniendo en peligro a los vehículos que transitan en esta vía.					
Nivel de Deficiencia (ND)	Muy Alto (MA)	Alto (A)	X	Medio (M)		
Nivel de Exposición (NE)	Continua (EC)	Frecuente (EF)	X	Ocasional (EO)	Esporádica (EE)	
Nivel de Probabilidad (NP)	Probable (P)	Ocasional (O)	X	Remoto (R)	Improbable (I)	
Nivel de Consecuencia (NC)	Crítico (C)	Alto (A)		Moderado (M)	X	Leve (L)
Consecuencias del accidente:	La falta de un control de ingreso en el trébol puede provocar colisiones vehiculares. Además, los peatones que se encuentran cerca de la confluencia se pueden ver involucrados, ocasionando lesiones graves mayormente en vehículos.					
Observaciones:						
	NIVEL DE RIESGO (NR)		NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)			
			Improbable (I)	Remoto (R)	Ocasional (O)	Probable (P)
	NIVEL DE CONSECUENCIAS (NC)	Crítico (C)	II	I	I	I
		Alto (A)	III	II	I	I
		Moderado (M)	IV	III	II	I
		Leve (L)	IV	IV	III	II
EVALUACIÓN						
I - Intolerable: Debe ser corregido incluso a un alto costo.			II - Alto: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.			X
III - Medio: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente si el costo del tratamiento es moderado.			III - Bajo: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo si el costo del tratamiento es bajo.			
EVIDENCIAS						
FOTOGRAFÍA			PLANO/ORTOFOTO

SUGERENCIAS						
Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.						

Figura 54. Tabla de Análisis de Riesgo Caso I. Fuente: Elaboración Propia.

En segundo lugar, la siguiente figura, al igual que para el primer caso se puede observar que también presenta un nivel de riesgo Alto. Por lo que incluso si el costo es elevado el riesgo se debe corregir.

IDENTIFICACIÓN DEL HALLAZGO - CASO II						
Ficha No.	AR-002	Fecha de creación:	15	Enero	2020	
Departamento:	Lima	Districtos:	San Borja - Surco			
Zona:	Urbana	Categoría de la vía:	Vía Expresa Nacional/Regional			
Nombre de la vía:	Panamericana					
Sentido:	Dos sentidos					
Hallazgo identificado:	Alta demanda vehicular sin control semafórico.					
Aspecto general:	Usuarios Vulnerables					
Aspecto específico:	Vehículos					
Autor:	Cutipa, John y Lozano, Edson					
ANÁLISIS DE RIESGO						
Descripción del hallazgo:	Se identificaron largas filas vehiculares en los lazos de ingreso a la vía principal. Esto provoca que exista mayor caos vehicular y probables accidentes en los lazos del trébol y en la vía principal.					
Nivel de Deficiencia (ND)	Muy Alto (MA)	Alto (A)	X	Medio (M)		
Nivel de Exposición (NE)	Continua (EC)	Frecuente (EF)	X	Ocasional (EO)	Esporádica (EE)	
Nivel de Probabilidad (NP)	Probable (P)	Ocasional (O)	X	Remoto (R)	Improbable (I)	
Nivel de Consecuencia (NC)	Crítico (C)	Alto (A)		Moderado (M)	X	Leve (L)
Consecuencias del accidente:	Las largas filas vehiculares pueden ocasionar colisiones leves a moderadas, debido a que los vehículos constantemente deben de realizar peligrosas maniobras para avanzar en el tráfico presente.					
Observaciones:						
	NIVEL DE RIESGO (NR)		NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)			
			Improbable (I)	Remoto (R)	Ocasional (O)	Probable (P)
NIVEL DE CONSECUENCIAS (NC)	Crítico (C)	II	I	I	I	I
	Alto (A)	III	II	II	I	I
	Moderado (M)	IV	III	II	I	I
	Leve (L)	IV	IV	III	II	II
EVALUACIÓN						
I - Intolerable: Debe ser corregido incluso a un alto costo.			II - Alto: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.			X
III - Medio: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente si el costo del tratamiento es moderado.			III - Bajo: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo si el costo del tratamiento es bajo.			
EVIDENCIAS						
FOTOGRAFÍA			PLANO/ORTOFOTO

SUGERENCIAS						
Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.						

Figura 55. Tabla de análisis de riesgo para el caso II. Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, se observa un nivel de riesgo alto para el tercer conflicto identificado. Por lo tanto, tal como se mencionó en los casos anteriores, el riesgo debe de ser corregido o significativamente reducido, a pesar de que la solución conlleve un costo alto. En la siguiente figura, se observa el análisis del tercer conflicto.

IDENTIFICACIÓN DEL HALLAZGO - CASO III						
Ficha No.	AR-002	Fecha de creación:	15	Enero	2020	
Departamento:	Lima	Districtos:	San Borja - Surco			
Zona:	Urbana	Categoría de la vía:	Vía Expresa Nacional/Regional			
Nombre de la vía:	Panamericana					
Sentido:	Dos sentidos					
Hallazgo identificado:	Inadecuada dosificación vehicular.					
Aspecto general:	Usuarios Vulnerables					
Aspecto específico:	Vehículos					
Autor:	Cutipa, John y Lozano, Edson					
ANÁLISIS DE RIESGO						
Descripción del hallazgo:	Se pudo observar una inadecuada dosificación vehicular en los lazos del trébol que confluyen con la vía principal.					
Nivel de Deficiencia (ND)	Muy Alto (MA)	X	Alto (A)	Medio (M)		
Nivel de Exposición (NE)	Continua (EC)		Frecuente (EF)	X	Ocasional (EO)	Esporádica (EE)
Nivel de Probabilidad (NP)	Probable (P)	X	Ocasional (O)	Remoto (R)	Improbable (I)	
Nivel de Consecuencia (NC)	Crítico (C)		Alto (A)	Moderado (M)	Leve (L)	X
Consecuencias del accidente:	La inadecuada dosificación vehicular puede provocar colisiones leves a moderadas, debido a que los vehículos constantemente deben de parar y acelerar para poder ingresar a la vía principal del trébol.					
Observaciones:						
	NIVEL DE RIESGO (NR)		NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)			
			Improbable (I)	Remoto (R)	Ocasional (O)	Probable (P)
NIVEL DE CONSECUENCIAS (NC)	Crítico (C)	II	I	I	I	I
	Alto (A)	III	II	I	I	I
	Moderado (M)	IV	III	II	I	I
	Leve (L)	IV	IV	III	II	II
EVALUACIÓN						
I - Intolerable: Debe ser corregido incluso a un alto costo.			II - Alto: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.			X
III - Medio: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente si el costo del tratamiento es moderado.			III - Bajo: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo si el costo del tratamiento es bajo.			
EVIDENCIAS						
FOTOGRAFÍA			PLANO/ORTOFOTO

SUGERENCIAS						
Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.						

Figura 56. Tabla de análisis de riesgo para el caso III. Fuente: Elaboración propia.

Concluyendo con el análisis de riesgo, en la siguiente figura se puede identificar que el cuarto caso es el más crítico. En la evaluación realizada se obtuvo un riesgo nivel I, esto significa que el riesgo es intolerable y que, por lo tanto, es recomendable que sea corregido incluso si conlleva un costo elevado para evitar mayores pérdidas.

IDENTIFICACIÓN DEL HALLAZGO - CASO IV						
Ficha No.	AR-001	Fecha de creación:	15	Enero	2020	
Departamento:	Lima	Distritos:	San Borja - Surco			
Zona:	Urbana	Categoría de la vía:	Vía Expresa Nacional/Regional			
Nombre de la vía:	Panamericana					
Sentido:	Dos sentidos					
Hallazgo identificado:	Vehículos interrumpen el flujo vehicular invadiendo el carril adyacente.					
Aspecto general:	Usuarios Vulnerables					
Aspecto específico:	Vehículos					
Autor:	Cutipa, John y Lozano, Edson					
ANÁLISIS DE RIESGO						
Descripción del hallazgo:	Se identificó que los vehículos invaden los carriles adyacentes al momento de ingresar a la vía principal desde los lazos de trébol.					
Nivel de Deficiencia (ND)	Muy Alto (MA)	X	Alto (A)	Medio (M)		
Nivel de Exposición (NE)	Continua (EC)		Frecuente (EF)	X	Ocasional (EO)	Esporádica (EE)
Nivel de Probabilidad (NP)	Probable (P)	X	Ocasional (O)	Remoto (R)		Improbable (I)
Nivel de Consecuencia (NC)	Crítico (C)		Alto (A)	Moderado (M)	X	Leve (L)
Consecuencias del accidente:	La invasión de las vías adyacentes puede ocasionar colisiones en cadena, lo que provocaría probables afectaciones humanas, vehiculares y posibles muertes.					
Observaciones:						
	NIVEL DE RIESGO (NR)		NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)			
			Improbable (I)	Remoto (R)	Ocasional (O)	Probable (P)
NIVEL DE CONSECUENCIAS (NC)	Crítico (C)	II	I	I	I	I
	Alto (A)	III	II	I	I	I
	Moderado (M)	IV	III	II	I	I
	Leve (L)	IV	IV	III	II	II
EVALUACIÓN						
I - Intolerable: Debe ser corregido incluso a un alto costo.			X II - Alto: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente incluso a un alto costo.			
III - Medio: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo significativamente si el costo del tratamiento es moderado.			III - Bajo: Debe ser corregido o se debe reducir el riesgo si el costo del tratamiento es bajo.			
EVIDENCIAS						
FOTOGRAFIA			PLANO/ORTOFOTO

SUGERENCIAS						
Debe ser corregido incluso a un elevado costo y así evitar mayores pérdidas.						

Figura 57. Tabla de análisis de riesgo para el caso IV. Fuente: Elaboración propia.

Continuando con los resultados obtenidos, los parámetros de los controladores fueron distintos para cada caso. Estos se simularon varias veces para calibrarlos, hasta obtener resultados óptimos. En los lazos donde se observó mayor inestabilidad en el comportamiento de conducción se asignó un mayor valor para el factor KR.

Para los porcentajes de ocupación deseada se utilizó el valor de 0,3 para los tres lazos, el cual es recomendado por Papageorgiou, et al (1991) autores. Tal como se mencionó en la explicación del algoritmo ALINEA, las distancias de los detectores de ocupación pueden variar de 40 a 500 m. aguas abajo. Teniendo en cuenta el comportamiento de conducción en el trébol, se asignaron las distancias de los detectores. El ciclo de actualización que más se

adaptó al trébol evaluado fue de 60 segundos. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 16. *Parámetros de los Controladores de Los Semáforos.*

Parámetros:	Lazos del trébol		
	Lazo Sur - Este	Lazo Norte - Este	Lazo Sur - Oeste
KR (factor regulador)	80	70	80
$\hat{O}$ (porcentaje de ocupación deseado)	0.3	0.3	0.3
Distancia de detector de ocupación (m)	40	70	220
Ciclo de actualización (s)	60	60	60

En la siguiente figura se muestra la distancia a la que se ubican los detectores de ocupación, estos se encuentran en la vía principal. De igual manera se presentan los detectores de presencia, los cuales están ubicados en los lazos. Finalmente, la imagen también indica la posición de los semáforos.

Figura 58. Distribución de los sensores de proximidad, ocupación y los semáforos en el trébol. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluaron tres parámetros para medir la operación vehicular en el trébol: tiempos promedio de viaje, velocidad promedio y flujo vehicular.

En primer lugar, los tiempos de viaje promedio se estimaron midiendo el tiempo que les tomó a los vehículos ir de un punto hacia otro durante las corridas de la simulación. En el trébol simulado se tomaron 3 segmentos críticos para el análisis, los cuales se ubicaron aguas abajo de las confluencias. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los tiempos de viaje en cada lazo. Aquí se verifica que los tiempos de viaje son mayores sin el control semafórico. Estos resultados evidencian que se requiere un control dinámico en cada lazo, para que los vehículos puedan circular con mayor fluidez.

Tabla 17. *Tiempos de Viaje en la Confluencia de Los Lazos.*

		Intervalos de tiempo (s)				
		600-1200	1200-1800	1800-2400	2400-3000	3000-3600
Sin control semafórico.	Lazo S-O	7.5	7.8	8.6	9.1	10.3
	Lazo N-E	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
	Lazo S-E	14.3	16.5	16.2	16.0	16.3
Con control semafórico.	Lazo S-O	7.5	7.5	7.5	7.5	7.6
	Lazo N-E	8.0	8.0	7.9	8.0	8.0
	Lazo S-E	13.3	13.3	13.5	13.3	13.3

La siguiente tabla muestra la disminución porcentual en cada lazo. Se observa una reducción máxima del tiempo de viaje de 19,1%, la cual fue en el lazo sur - este.

Tabla 18. *Porcentaje de Mejora en Tiempos de Viaje.*

	Tiempos de viaje (s)		%
	Sin control	Con control	
Lazo S-O	8.7	7.5	15.2
Lazo N-E	8.0	8.0	0.7
Lazo S-E	15.9	13.3	19.1

En segundo lugar, se evaluaron las velocidades en los segmentos críticos. Las siguientes gráficas muestran las diferencias en las velocidades a través del tiempo. Estas evidencian que cuando se tiene un control semafórico dinámico se puede mejorar las velocidades de los vehículos dentro del trébol.

Figura 59. Comparativa de velocidades en el lazo sur - oeste. Fuente: Elaboración propia.

Figura 60. Comparativa de velocidades en el lazo norte - este. Fuente: Elaboración propia.

Figura 61. Comparativa de velocidades en el lazo sur – este. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la tabla 4, en la cual se observa el incremento porcentual de las velocidades cuando se aplica un control semafórico dinámico. El valor máximo se obtuvo en el lazo sur - este de 15,8%.

Tabla 19. Porcentajes de Mejora en las Velocidades Promedio.

	Velocidades promedio (km/h)		%
	Sin control	Con control	
Lazo S-O	42.1	47.9	12.1
Lazo N-E	44.9	45.2	0.7
Lazo S-E	22.8	27.0	15.8

Finalmente, se evaluó el flujo vehicular. Este se incrementó en un 0.3% con el control semafórico, lo cual evidencia que una adecuada dosificación vehicular en los lazos del trébol ayuda a mejorar el flujo global. Si bien el porcentaje no es una cifra muy alta, representa un total de 30 vehículos adicionales que pudieron transitar por el trébol en un periodo de 1 hora.

7 CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Los sistemas de semaforización inteligente ayudan a los intercambios tipo trébol a reducir o eliminar los problemas de congestión. La metodología Ramp metering aplicado a tréboles es una propuesta que tiene la ventaja de optimizar la capacidad de la infraestructura ya existente. El algoritmo ALINEA en los lazos del trébol, a partir del ingreso de un vehículo en la autopista, permite calcular la dosificación óptima para los siguientes vehículos. Por lo tanto, asegura que el viaje se realice con mayor fluidez, velocidad y comodidad. A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas para cada objetivo.

- **Conclusión objetivo 1:** Luego de realizar el análisis de riesgo se identificó la existencia de un riesgo nivel II para tres casos observados, lo que significa que, según la evaluación, el trébol presenta un nivel de riesgo alto frente el desplazamiento vehicular. Asimismo, existe un caso con riesgo intolerable que representa un riesgo nivel I. Por lo tanto, este es el caso que se debe considerar para aplicar una solución viable, incluso si el costo es muy elevado. En este caso se pudo notar que los vehículos, al momento de ingresar a la vía principal, constantemente invaden los carriles adyacentes ocasionando probables accidentes fatales y afectaciones humanas y vehiculares. Es por esto que, para evitar estos accidentes fatales se debe implementar un sistema que minimice o elimine el riesgo intolerable presente. Por tal motivo, se eligió la metodología Ramp metering; ya que, se demostró que con el uso de semáforos inteligentes se ordena y dosifica el ingreso de vehículos desde las confluencias hacia las vías principales, lo que reduce los riesgos y conflictos en el trébol. Asimismo, esta metodología permitirá que las velocidades de desplazamiento se mantengan constantes, mejorando la fluidez y el comportamiento operacional de toda la intersección. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis del flujo vehicular y se determinó que la hora de estudio más adecuada es desde las 6:00 pm. hasta las 8:00 pm. de martes a jueves. Debido a que, en esos días de la semana, se identificó que el tráfico vehicular es mayor y menos variable.
- **Conclusión objetivo 2:** Se realizó el conteo vehicular, resultando un aforo de 4716 veh/h en la Vía expresa Javier Prado Este - Oeste, 5760 veh/h en la Vía Expresa Javier Prado Oeste - Este, 3612 veh/h en la Vía expresa Panamericana Sur - Norte y

3348 vehículos/h. en la Vía expresa Panamericana Norte – Sur. De igual manera, se identificó que los vehículos de carga pesada generan una mayor congestión y ralentización en el comportamiento operacional del trébol. Adicionalmente, tal como se observó en los datos de campo, se identificaron varios conflictos en las confluencias de los tres lazos del trébol. Esto debido a que los vehículos realizaban maniobras temerarias para ingresar a la vía principal. Se observó que en el lazo Sur – Este se puede formar una fila de vehículos en casi toda la circunferencia del lazo y es el que presenta una mayor cantidad de problemas en la confluencia, con un total de 7 conflictos en 10 minutos de evaluación. Por lo tanto, se puede concluir que los mayores tiempos de viaje se producen cuando existe una mayor cantidad de conflictos en las confluencias del trébol.

- **Conclusión objetivo 3:** El modelo de micro simulación se calibró y validó utilizando los siguientes parámetros de Wiedemann 74: $ax=1$, $bx_add=1$, $bx_mult=0.5$. La representación de la disminución de velocidad en los lazos del trébol se realizó aplicando zonas de reducción de velocidad en los lazos del trébol de 40 km/h. Se utilizó la herramienta reglas de prioridad en las confluencias del trébol para representar las prioridades de desplazamiento de los vehículos en cada lazo que confluye hacia la vía principal. Finalmente, en lo que respecta a las áreas de conflicto en las confluencias del trébol se implementó, para el lazo Nor – Este, un área de conflicto y así poder representar adecuadamente lo identificado. Se puede concluir que con estas configuraciones se obtiene una calibración y validación dentro de la zona de no rechazo, lo que comprueba que la prueba no paramétrica de diferencia de medias obtuvo los resultados esperados, puesto que esta prueba se llevó a cabo con un 95% de nivel de confianza.
- **Conclusión objetivo 4:** Luego de aplicar la metodología Ramp metering con el algoritmo ALINEA se obtuvo una mejora en la utilización de los espacios entre vehículos de la vía principal, dosificando mejor el ingreso de los vehículos hacia esta vía. El código creado en el módulo VisVAP, demostró que los vehículos ubicados en los lazos pueden ingresar con mayor fluidez a la vía principal; ya que, aprovechan el espacio entre los vehículos que se desplazan en las vías principales. De esta manera, los vehículos de la vía principal no tienen necesidad de reducir su velocidad o de detenerse. Además, permite que los vehículos mantengan una velocidad constante en

estas vías. Esto produce el incremento de la velocidad promedio de operación, la disminución en los tiempos promedios de viaje del trébol y un leve incremento en el aforo del trébol. El valor máximo se obtuvo en el lazo Sur - Este, logrando alcanzar un incremento de 15,8% en la velocidad promedio de operación. Adicionalmente, se logró reducir el tiempo de viaje promedio en los tres lazos del trébol, logrando una disminución máxima en el lazo Sur - Este de 19,1% en el tiempo promedio de viaje. Finalmente, luego de aplicar la metodología propuesta se obtuvo un incremento de 0.3% en el aforo vehicular. Por lo tanto, se puede concluir que la implementación de semáforos inteligentes en el trébol mejora la fluidez y reduce los conflictos en las confluencias. Lo que provoca una sinergia que optimiza la operación total del trébol.

- **Conclusión objetivo 5:** Para poder regular los flujos vehiculares en las vías expresas y lazos del trébol se tuvo que realizar diversas simulaciones iterativas hasta conseguir la distancia óptima de semáforos y detectores. El algoritmo ALINEA recomienda que los detectores se encuentren entre 40 y 500m aguas abajo de la confluencia vehicular y que los semáforos estén lo más cerca posible de la confluencia. Por lo tanto, se inició con estos valores y consideraciones para ubicar los detectores y semáforos. Los semáforos se ubicaron a 5m de la confluencia, ya que no se observaron variaciones en los resultados, se mantuvo esta distancia para las simulaciones. Para el caso de los detectores, debido a que presentan un rango amplio de aplicación, los resultados mostraron mucha variabilidad. Por lo que no se pudo identificar un panorama claro para su ubicación. Es por esto que las iteraciones se realizaron en diversas oportunidades hasta conseguir un resultado óptimo. El cual se obtuvo con las siguientes ubicaciones aguas abajo de las confluencias: 40m para el lazo Sur - Este, 70m para el lazo Norte - Este y 220m para el lazo Sur - Oeste. Ante esto, se puede concluir que debido a la variabilidad del desplazamiento y comportamiento de los vehículos se debe de analizar cada lazo independientemente y a su vez monitorear el conjunto de lazos que conforman el trébol.

7.2 Recomendaciones

- Para poder realizar un análisis más detallado se debe de considerar el desplazamiento de la mayor cantidad de tipos posibles de vehículos en la clasificación vehicular. De igual manera, con el objetivo de lograr una mejor aproximación a la realidad observada, es importante incluir el comportamiento de las motos lineales, aunque para este estudio su influencia fue mínima. Por lo tanto, se recomienda realizar un estudio de estos vehículos, ya que también influyen en el comportamiento operacional y de manejo de las intersecciones y del trébol.
- La disminución de los tiempos de viaje e incremento en la velocidad promedio de operación, mejoraron el comportamiento operacional del trébol. Ante esto, se recomienda realizar un análisis adicional de CO₂ para evaluar las nuevas condiciones de contaminación debido a la mejora global del flujo vehicular del trébol.
- En las visitas realizadas y los videos analizados, se observó que los conductores realizan maniobras temerarias, invadiendo constantemente otros carriles e interrumpiendo el desplazamiento de otros vehículos que se desplazan en las vías. Por lo tanto, es recomendable, realizar una adecuada recopilación de datos y un análisis minucioso al momento de calibrar y validar el modelo, ya que la elevada variabilidad en el comportamiento de conducción puede generar una comparativa no muy cercana a la realidad.
- A pesar de que esta metodología es ampliamente aplicada en diversos países del mundo, principalmente en países desarrollados, está carece de estudios en Perú y se encuentra infrautilizada. Ante esto, se plantea que esta investigación, sirva de base y así poder replicar su uso y funcionamiento en diversos tipos de intersecciones viales a nivel o desnivel. De esta manera, se promovería el uso de la tecnología Ramp metering, con el objetivo proporcionar mejoras inteligentes al tráfico del país.
- Adicionalmente, a las recomendaciones previamente presentadas, es importante señalar que se debe evaluar la disminución de accidentes y conflictos vehiculares en los lazos y vías principales del trébol. Debido a que la utilización de semáforos adaptativos ordena el ingreso de los vehículos desde los lazos del trébol hacia las vías principales, disminuyendo y organizando el desorden existente.

8 **[REFERENCIAS]**

- Abuamer, I. y Celikoglu, H. (2017). Local Ramp Metering Strategy ALINEA: Microscopic Simulation Based Evaluation Study on Istanbul Freeways. *Transportation Research Procedia*, 22, 598-606.
- Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV). (2020). Guía Técnica de Auditorías e Inspecciones de Seguridad Vial para Colombia. Recuperado de: <https://www.mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=24002>
- Al-Ahmadi, H.M., Jamal, A., Reza, I., Assi, K., & Ahmed, S.A. (2019). Using Microscopic Simulation-Based Analysis to Model Driving Behavior: A Case Study of Khobar-Dammam in Saudi Arabia. *Sustainability*, 11, 3018.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2018). A policy on Geometric Design of Highways and Streets. Washington, United States of America.
- Arce, D.M. (2017). Sistema Autónomo de Control de Tráfico Vehicular para Intersecciones de Avenidas. (Tesis de Magister, Pontifica Universidad Católica de Perú, Facultad de Ingeniería. Lima, Perú).
- Berg, P., & Wilson, E. (2003). Microscopic Parameters and Macroscopic Features of Traffic Flow. *Interface and Transport Dynamics*, 329–342. doi:10.1007/978-3-662-07969-0_32
- Bestratén, M., & Pareja, F. (2010). NTP 330: Sistema simplificado de evaluación de riesgos de accidente. Recuperado de: https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp_330.pdf/e0ba3d17-b43d-4521-905d-863fc7cb800b
- Cabrera, F. & Dextre, J. C. (2014). Using the social Force Model to Represent the Behavior of Pedestrians at Chaotic Intersections of Developing Countries: The Case of Perú. *Springer International Publishing*, pp. 1039-1049.
- Cabrera, F. (2015). Micro simulación de vehículos y peatones. *Revista Civilízate*, pp. 33-34.
- Cascetta, E., Pagliara, F., & Papola, A. (2007). Governance of Urban Mobility: Complex Systems and Integrated Policies. *Advances in Complex Systems*, 10(2), 339–354.

- CDM Smith (2015). US 231 Scottsville Road Scoping and Traffic Operations Study Final Report. Appendix B: VISSIM Development and Calibration Report. Recuperado de: <https://transportation.ky.gov/Planning/Planning%20Studies%20and%20Reports/US%20231%20Scottsville%20Road%20Scoping%20and%20Traffic%20Operations%20Study%20Final%20Report.pdf> [Consulta 26 de setiembre de 2019]
- Chaudhary, N. A., Tian, Z., Messer, C.J., & Chu, C. (2004). Ramp Metering Algorithms and Approaches for Texas. Recuperado de <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-4629-1.pdf>
- Chen, J., Lin, W., Yang, Z., Li, J. y Cheng, P. (2019). Adaptive Ramp Metering Control for Urban Freeway Using Large-Scale Data. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, 68(10), 9507-9518.
- Chu, L., Liu, H.X., Recker, W. y Zhang, H.M. (2004). Performance evaluation of adaptive ramp-metering algorithms using microscopic traffic simulation model. Journal of Transportation Engineering 130 (3), 330–338.
- Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). (2014). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume 5 – Sinalização Semafórica. Recuperado de <https://seabrasolucoes.com.br/manual-sinalizacao-contran/>
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modelling Software. Recuperado de https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol3/vol3_guidelines.pdf
- Federal Highway Administration (FHWA). (2012). FHWA Design Discipline Support Tool. Interchange Design (New Construction and Reconstruction) Prompt-List for Assessing Key Geometric Features. Recuperado de https://www.fhwa.dot.gov/modiv/programs/intersta/docs/interchange_design_promptlist.pdf
- Federal Highway Administration (FHWA). (2014). Ramp Metering: A Proven Effective Strategy. Recuperado de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14021/fhwahop14021.pdf>

- Fellendorf, M. y Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, 145, 63–93.
- Florida Department of Transportation (FDOT). (2010). Ramp Signaling Frequently Asked Questions. Recuperado de https://95express.com/wp-content/files/2010_0407_RS%20FAQ%20Final.pdf
- Garber, N. J., & Fontaine, M. D (1999). Final Report. Guidelines for Preliminary Selection of The Optimum Interchange Type for A Specific Location. Recuperado de http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/99-r15.pdf
- Ghazal, B., El Khatib, K., Chahine, K., & Kherfan, M. (2016). Smart Traffic Light Control System. doi: [10.1109/EECEA.2016.7470780](https://doi.org/10.1109/EECEA.2016.7470780).
- Ghiasi, A., Hale, D., Bared, J., Kondyli, A. y Ma, J. (2018). A Dynamic Signal Control Approach for Integrated Ramp and Mainline Metering, 2892-2898. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569567.
- JICA. (2013). Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2016). Manual de Dispositivos de Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras. Recuperado de: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20de%20Dispositivos%20de%20Control%20del%20Transito%20FINANALIZADO_24%20Mayo_2016.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2018). Glosario de Términos de Uso Frecuente en Proyectos de Infraestructura Vial. [Resolución Directoral N° 02-2018-MTC/14]. Recuperado de: http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_4032.pdf [Consulta 26 de setiembre de 2019]
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2018). Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG – 2018. Recuperado de: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf [Consulta 26 de setiembre de 2019]

- Mizuta, A., Roberts, K., Jacobsen, L., & Thompson, N. (2014). Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy—A Primer. Recuperado de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14020/fhwahop14020.pdf>
- Montenegro, J. C., & Lozano, A. d. R. (2013). Simulación microscópica del tránsito. Río de Janeiro, Brasil, s.n.
- Novikov, A., Novikov, I., Shevtsova, A. y Burlutskaya, A. (2019). ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ RAMP METERING НА ДВУХУРОВНЕВЫХ РАЗВЯЗКАХ. The Russian Automobile and Highway Industry Journal, 16(2), 166-180.
- ORDENANZA N° 2015 (15 de diciembre de 2016). En: Normas Legales, N° 607185. Diario Oficial “El Peruano”. Lima: Congreso de la República.
- Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H. y Middleham, F. (1997). ALINEA Local Ramp Metering. Summary of Field Results. Transportation research Record, 1603, 90-98.
- Papageorgiou, M., Hadj-Salem, M. y Blosseville, J. (1991). ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. Transportation Research Record, 1320, 58-64.
- Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., Papamichail, I. y Wang, Y. (2008). A Misapplication of the Local Ramp Metering Strategy ALINEA. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9 (2), 360-365.
- Planung Transport Verkehr (PTV AG). (2018). PTV VISSIM 11 User Manual. Karlsruhe, Germany.
- PTV AG. (2011). VISSIM 5.40 User Manual. Karlsruhe, Germany.
- Real Academia Española (RAE). (2019). Modelo. En Diccionario de la Lengua Española. Recuperado de <http://www.rae.es/> [Consulta: 9 de setiembre 2019].
- Reyes Espíndola, R., & Cárdenas, J. (2007). Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones, México DF, México: Alfaomega.
- Sercan, Ali. y Ergün, Murat. (2015). Efficiency analysis of the dynamic traffic control for an urban highway. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 52.
- Simpson, S., Riley, D., & United Civil Group. (2013). ADOT System-Wide Ramp Metering Evaluation. Recuperado de https://azdot.gov/sites/default/files/2019/06/adotsystemwiderampmeteringevaluation_november2013.pdf

- Sykes, P. (2010). Traffic Simulation with Paramics. En J. Barceló (Ed.) *Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science* (pp. 63-93). New York, Estados Unidos: Springer. Doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_2
- TomTom (2019). Lima Traffic Report. Recuperado de https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/lima-traffic.
- Virginia Department of Transportation [VDOT]. (2020). VDOT Vissim User Guide Version 2.0. Recuperado de http://www.virginiadot.org/business/resources/VDOT_Vissim_UserGuide_Version_2.0_Final_2020-01-10.pdf
- Wiedemann, R. (1991). Modeling of RTI-Elements on Multi lane Roads. Advanced Telematics in Road Transport Edited by the Commission of the European Community.
- Wunderlich, W., Vasudevan, M., & Wang, P. (2019) TAT Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modelling Software 2019 Update to the 2004 Version. Recuperado de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop18036/fhwahop18036.pdf>

7. [ANEXOS]

Anexo N.1: Flujo vehicular.

Vía	Flujo Vehicular (veh/h)
Vía Expresa Javier Prado Este - Oeste	4716
Vía Expresa Javier Prado Oeste - Este	5760
Carretera Panamericana Sur - Norte	3612
Carretera Panamericana Norte - Sur	3348

Anexo N.2: Relative flows de vehículos.

1RA FILMACION : TARDE						REL_FLOW_ROUTES				
1ra filmacion	video de 1GB					porcentajes	porcentajes	porcentajes	porcentajes	porcentajes
	vehiculos	buses	camiones	total	totalxhora					
jp e-o	757	23	6	786	4716	98.0				
jp o-e	922	24	14	960	5760		91.2			
Lazo N-E	181	3	1	185	1110			22.7		
estac_Hipodromo	12	0	0	12	72		1.1			
Anexo nor-este jp-panam	16	0	0	16	96	2.0				
REL_FLOW_COMP JP_E-O						4812		6318		
REL_FLOW_COMP JP_O-E										
1RA FILMACION :TARDE						REL_FLOW_ROUTES				
Video 1.6 Gb	vehiculos	buses	camiones	total	totalxhora	porcentajes	porcentajes	porcentajes	porcentajes	porcentajes
Panamericana SUR - NORTE	454	66	82	602	3612	81.5				77.3
Panamericana NORTE - SUR	436	46	76	558	3348		78.2			
Lazo SUR - NORTE	200	5	7	212	1272			7.7		
Lazo NORTE - SUR panam-jp	87	2	4	93	558		13.0			
Anexo nor-oeste panam-jp	150	1	5	156	936		8.8			
Anexo: sur este panam-jp	129	2	6	137	822	18.5				
REL_FLOW_COMP_PANA_S-N						4434		4284		4884
REL_FLOW_COMP_PANA_N-S										

Anexo N.3: Conteos vehiculares de 1 hora en la primera y segunda filmaciones.

1ra filmación	1RA FILMACION				
	video de 1GB				
	vehículos	buses	camiones	total	totalxhora
jp e-o	757	23	6	786	4716
jp o-e	922	24	14	960	5760
Lazo N-E	181	3	1	185	1110
estac_Hipodromo	12	0	0	12	72
Anexo nor-este jp-panam	16	0	0	16	96

	1RA FILMACION				
Video 1.6 Gb	vehículos	buses	camiones	total	totalxhora
Panamericana SUR - NORTE	454	66	82	602	3612
Panamericana NORTE - SUR	436	46	76	558	3348
Lazo SUR - NORTE	200	5	7	212	1272
Lazo NORTE - SUR panam-jp	87	2	4	93	558
Anexo nor-oeste panam-jp	150	1	5	156	936
Anexo: sur este panam-jp	129	2	6	137	822

	2DA FILMACION:				
Video 800 Mb	vehículos	buses	camiones	total	totalxhora
Panamericana SUR - NORTE	454	62	86	602	3612
Panamericana NORTE - SUR	426	44	50	520	3120
lazo N-E	161		1	162	972
estac_Hipodromo	11	0	0	11	66
anexo nor-este jp-panam	18	0	0	18	108

	2DA FILMACION:				
	vehículos	buses	camiones	total	totalxhora
jp e-o	817	26	8	851	5106
jp o-e	959	23	15	997	5982
Lazo SUR - NORTE	262	6	10	278	1668
Lazo NORTE - SUR panam-jp	109	1	1	111	666
Anexo nor-oeste panam-jp	173	1	1	175	1050
anexo: sur este panam-JP	140	1	2	143	858

Anexo N.4: Distribución de velocidades Javier prado oeste a este, día 1.

JAVIER PRADO OESTE - ESTE							
Nro Muestra	Tiempo				Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	12.62	54.6	55	46.6	156.2	12.4	44.6
2	13.87	54.6	55	46.6	156.2	11.3	40.5
3	11.45	54.6	55	46.6	156.2	13.6	49.1
4	9.69	54.6	55	46.6	156.2	16.1	58.0
5	9.42	54.6	55	46.6	156.2	16.6	59.7
6	11.92	54.6	55	46.6	156.2	13.1	47.2
7	11.84	54.6	55	46.6	156.2	13.2	47.5
8	12.04	54.6	55	46.6	156.2	13.0	46.7
9	11.79	54.6	55	46.6	156.2	13.2	47.7
10	13.68	54.6	55	46.6	156.2	11.4	41.1
11	11.51	54.6	55	46.6	156.2	13.6	48.9
12	12.05	54.6	55	46.6	156.2	13.0	46.7
13	11.31	54.6	55	46.6	156.2	13.8	49.7
14	12.38	54.6	55	46.6	156.2	12.6	45.4
15	13.28	54.6	55	46.6	156.2	11.8	42.3
16	10.27	54.6	55	46.6	156.2	15.2	54.8
17	11.59	54.6	55	46.6	156.2	13.5	48.5
18	16.06	54.6	55	46.6	156.2	9.7	35.0
19	8.9	54.6	55	46.6	156.2	17.6	63.2
20	8.91	54.6	55	46.6	156.2	17.5	63.1
21	9.48	54.6	55	46.6	156.2	16.5	59.3
22	11.44	54.6	55	46.6	156.2	13.7	49.2
23	10.39	54.6	55	46.6	156.2	15.0	54.1
24	11.57	54.6	55	46.6	156.2	13.5	48.6
25	12.42	54.6	55	46.6	156.2	12.6	45.3

Anexo N.5: Distribución de velocidades Javier prado oeste a este, día 2.

JAVIER PRADO OESTE - ESTE							
Nro Muestra	Tiempo				Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	9.37	54.6	55	46.6	156.2	16.7	60.0
2	13.45	54.6	55	46.6	156.2	11.6	41.8
3	12.45	54.6	55	46.6	156.2	12.5	45.2
4	12.46	54.6	55	46.6	156.2	12.5	45.1
5	10.16	54.6	55	46.6	156.2	15.4	55.3
6	11.62	54.6	55	46.6	156.2	13.4	48.4
7	11.52	54.6	55	46.6	156.2	13.6	48.8
8	15.53	54.6	55	46.6	156.2	10.1	36.2
9	12.31	54.6	55	46.6	156.2	12.7	45.7
10	8.44	54.6	55	46.6	156.2	18.5	66.6
11	12.17	54.6	55	46.6	156.2	12.8	46.2
12	23.43	54.6	55	46.6	156.2	6.7	24.0
13	12.7	54.6	55	46.6	156.2	12.3	44.3
14	12.7	54.6	55	46.6	156.2	12.3	44.3
15	11.19	54.6	55	46.6	156.2	14.0	50.3
16	11.39	54.6	55	46.6	156.2	13.7	49.4
17	10.53	54.6	55	46.6	156.2	14.8	53.4
18	16.36	54.6	55	46.6	156.2	9.5	34.4
19	12.5	54.6	55	46.6	156.2	12.5	45.0
20	15.11	54.6	55	46.6	156.2	10.3	37.2
21	10.6	54.6	55	46.6	156.2	14.7	53.0
22	12.77	54.6	55	46.6	156.2	12.2	44.0
23	12.1	54.6	55	46.6	156.2	12.9	46.5
24	11.71	54.6	55	46.6	156.2	13.3	48.0
25	12.24	54.6	55	46.6	156.2	12.8	45.9

Anexo N.6: Distribución de velocidades Javier prado este a oeste, día 1.

JAVIER PRADO ESTE - OESTE							
Nro Muestra	Tiempo				Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	6.82	33.1	38.9	21.2	93.2	13.7	49.2
2	5.95	33.1	38.9	21.2	93.2	15.7	56.4
3	5.88	33.1	38.9	21.2	93.2	15.9	57.1
4	7.47	33.1	38.9	21.2	93.2	12.5	44.9
5	8.44	33.1	38.9	21.2	93.2	11.0	39.8
6	8.97	33.1	38.9	21.2	93.2	10.4	37.4
7	6.87	33.1	38.9	21.2	93.2	13.6	48.8
8	7.6	33.1	38.9	21.2	93.2	12.3	44.1
9	12.35	33.1	38.9	21.2	93.2	7.5	27.2
10	6.41	33.1	38.9	21.2	93.2	14.5	52.3
11	7.78	33.1	38.9	21.2	93.2	12.0	43.1
12	6.56	33.1	38.9	21.2	93.2	14.2	51.1
13	7.2	33.1	38.9	21.2	93.2	12.9	46.6
14	5.81	33.1	38.9	21.2	93.2	16.0	57.7
15	7.84	33.1	38.9	21.2	93.2	11.9	42.8
16	5.18	33.1	38.9	21.2	93.2	18.0	64.8
17	8.96	33.1	38.9	21.2	93.2	10.4	37.4
18	6.22	33.1	38.9	21.2	93.2	15.0	53.9
19	5.18	33.1	38.9	21.2	93.2	18.0	64.8
20	7.73	33.1	38.9	21.2	93.2	12.1	43.4
21	6.73	33.1	38.9	21.2	93.2	13.8	49.9
22	6.74	33.1	38.9	21.2	93.2	13.8	49.8
23	6.14	33.1	38.9	21.2	93.2	15.2	54.6
24	7.79	33.1	38.9	21.2	93.2	12.0	43.1
25	5.84	33.1	38.9	21.2	93.2	16.0	57.5

Anexo N.7: Distribución de velocidades Javier prado este a oeste, día 2.

JAVIER PRADO ESTE - OESTE							
Nro Muestra	Tiempo				Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	6.714	33.1	38.9	21.2	93.2	13.9	50.0
2	8.829	33.1	38.9	21.2	93.2	10.6	38.0
3	6.885	33.1	38.9	21.2	93.2	13.5	48.7
4	5.193	33.1	38.9	21.2	93.2	17.9	64.6
5	6.597	33.1	38.9	21.2	93.2	14.1	50.9
6	8.307	33.1	38.9	21.2	93.2	11.2	40.4
7	8.955	33.1	38.9	21.2	93.2	10.4	37.5
8	5.472	33.1	38.9	21.2	93.2	17.0	61.3
9	8.19	33.1	38.9	21.2	93.2	11.4	41.0
10	7.236	33.1	38.9	21.2	93.2	12.9	46.4
11	7.542	33.1	38.9	21.2	93.2	12.4	44.5
12	6.057	33.1	38.9	21.2	93.2	15.4	55.4
13	9.198	33.1	38.9	21.2	93.2	10.1	36.5
14	10.017	33.1	38.9	21.2	93.2	9.3	33.5
15	7.614	33.1	38.9	21.2	93.2	12.2	44.1
16	7.542	33.1	38.9	21.2	93.2	12.4	44.5
17	8.658	33.1	38.9	21.2	93.2	10.8	38.8
18	8.532	33.1	38.9	21.2	93.2	10.9	39.3
19	5.292	33.1	38.9	21.2	93.2	17.6	63.4
20	8.073	33.1	38.9	21.2	93.2	11.5	41.6
21	5.697	33.1	38.9	21.2	93.2	16.4	58.9
22	5.247	33.1	38.9	21.2	93.2	17.8	63.9
23	6.318	33.1	38.9	21.2	93.2	14.8	53.1
24	6.552	33.1	38.9	21.2	93.2	14.2	51.2
25	8.604	33.1	38.9	21.2	93.2	10.8	39.0

Anexo N.8: Distribución de velocidades Panamericana Sur a Norte, día 1.

PANAMERICANA SUR-NORTE						
Nro Muestra	Tiempo			Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	5.03			46	9.1	32.9
2	3.47			46	13.3	47.7
3	3.92			46	11.7	42.2
4	5.51			46	8.3	30.1
5	5.69			46	8.1	29.1
6	4.65			46	9.9	35.6
7	4.58			46	10.0	36.2
8	6.94			46	6.6	23.9
9	5.24			46	8.8	31.6
10	9.63			46	4.8	17.2
11	7.14			46	6.4	23.2
12	6.02			46	7.6	27.5
13	4.72			46	9.7	35.1
14	5.16			46	8.9	32.1
15	5.88			46	7.8	28.2
16	7.2			46	6.4	23.0
17	3.87			46	11.9	42.8
18	3.86			46	11.9	42.9
19	4.78			46	9.6	34.6
20	4.91			46	9.4	33.7
21	4.32			46	10.6	38.3
22	4.25			46	10.8	39.0
23	8.84			46	5.2	18.7
24	6.73			46	6.8	24.6
25	4.65			46	9.9	35.6

Anexo N.9: Distribución de velocidades Panamericana Sur a Norte, día 2.

PANAMERICANA SUR-NORTE						
Nro Muestra	Tiempo			Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	6.363			46	7.2	26.0
2	7.011			46	6.6	23.6
3	3.717			46	12.4	44.6
4	5.184			46	8.9	31.9
5	4.248			46	10.8	39.0
6	7.839			46	5.9	21.1
7	10.782			46	4.3	15.4
8	6.246			46	7.4	26.5
9	6.183			46	7.4	26.8
10	6.534			46	7.0	25.3
11	9.594			46	4.8	17.3
12	7.083			46	6.5	23.4
13	5.067			46	9.1	32.7
14	5.193			46	8.9	31.9
15	5.769			46	8.0	28.7
16	5.364			46	8.6	30.9
17	5.652			46	8.1	29.3
18	8.415			46	5.5	19.7
19	6.282			46	7.3	26.4
20	6.831			46	6.7	24.2
21	4.473			46	10.3	37.0
22	6.183			46	7.4	26.8
23	5.823			46	7.9	28.4
24	9.936			46	4.6	16.7
25	5.004			46	9.2	33.1

Anexo N.10: Distribución de velocidades Panamericana Norte a Sur, día 1.

PANAMERICANA NORTE-SUR						
Nro Muestra	Tiempo			Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	3.76			54.6	14.5	52.3
2	3.54			54.6	15.4	55.5
3	4.19			54.6	13.0	46.9
4	3.47			54.6	15.7	56.6
5	5.48			54.6	10.0	35.9
6	3.25			54.6	16.8	60.5
7	4.04			54.6	13.5	48.7
8	3.62			54.6	15.1	54.3
9	4.11			54.6	13.3	47.8
10	3.78			54.6	14.4	52.0
11	3.88			54.6	14.1	50.7
12	3.64			54.6	15.0	54.0
13	3.88			54.6	14.1	50.7
14	3.88			54.6	14.1	50.7
15	3.68			54.6	14.8	53.4
16	4.92			54.6	11.1	40.0
17	5.24			54.6	10.4	37.5
18	3.75			54.6	14.6	52.4
19	3.95			54.6	13.8	49.8
20	3.43			54.6	15.9	57.3
21	4.27			54.6	12.8	46.0
22	6.35			54.6	8.6	31.0
23	5.12			54.6	10.7	38.4
24	3.96			54.6	13.8	49.6
25	4.72			54.6	11.6	41.6

Anexo N.11: Distribución de velocidades Panamericana Norte a Sur, día 2.

PANAMERICANA NORTE-SUR						
Nro Muestra	Tiempo			Distancia	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)
1	3.92			54.6	13.9	50.1
2	3.99			54.6	13.7	49.3
3	3.93			54.6	13.9	50.0
4	4			54.6	13.7	49.1
5	4.2			54.6	13.0	46.8
6	4.06			54.6	13.4	48.4
7	3.79			54.6	14.4	51.9
8	4.27			54.6	12.8	46.0
9	4.72			54.6	11.6	41.6
10	6.75			54.6	8.1	29.1
11	7.25			54.6	7.5	27.1
12	5.1			54.6	10.7	38.5
13	4.31			54.6	12.7	45.6
14	4.26			54.6	12.8	46.1
15	4.85			54.6	11.3	40.5
16	4.58			54.6	11.9	42.9
17	7.52			54.6	7.3	26.1
18	5.43			54.6	10.1	36.2
19	8.97			54.6	6.1	21.9
20	5.63			54.6	9.7	34.9
21	3.87			54.6	14.1	50.8
22	4.45			54.6	12.3	44.2
23	3.47			54.6	15.7	56.6
24	4.64			54.6	11.8	42.4
25	4.07			54.6	13.4	48.3

Anexo N.12: Distribución de velocidades en el lazo Norte- Este.

LAZO N-E				
video_tarde				
nro muestra	distancia (m)	tiempo	m/s	
1	113.27	14.9	7.60201342	27.3672483
2	113.27	10.8	10.487963	37.7566667
3	113.27	16	7.079375	25.48575
4	113.27	17.5	6.47257143	23.3012571
5	113.27	13.2	8.58106061	30.8918182
6	113.27	21	5.39380952	19.4177143
7	113.27	22.9	4.94628821	17.8066376
8	113.27	16.5	6.86484848	24.7134545
9	113.27	13.5	8.39037037	30.2053333
10	113.27	17.2	6.58546512	23.7076744
11	113.27	13.9	8.14892086	29.3361151
12	113.27	13.7	8.26788321	29.7643796
13	113.27	14.67	7.72119973	27.796319
14	113.27	14.4	7.86597222	28.3175
15	113.27	16.7	6.78263473	24.417485
16	113.27	23	4.92478261	17.7292174
17	113.27	23.2	4.88232759	17.5763793
18	113.27	15.8	7.16898734	25.8083544
19	113.27	16.5	6.86484848	24.7134545
20	113.27	13	8.71307692	31.3670769
21	113.27	18.2	6.22362637	22.4050549
22	113.27	17.5	6.47257143	23.3012571
23	113.27	10.7	10.5859813	38.1095327
24	113.27	12	9.43916667	33.981
25	113.27	18.4	6.15597826	22.1615217

conteo de frecuencias							
nro intervalo	intervalo velocidades en m/s		f	F	h	H	Veloc_Km/h
1	4.882	5.682	4	4	0.16	0.16	20.4563793
2	5.682	6.482	4	8	0.16	0.32	23.3363793
3	6.482	7.282	6	14	0.24	0.56	26.2163793
4	7.282	8.082	3	17	0.12	0.68	29.0963793
5	8.082	8.882	5	22	0.2	0.88	31.9763793
6	8.882	9.682	1	23	0.04	0.92	34.8563793
7	9.682	10.482	0	23	0	0.92	37.7363793
8	10.482	11.282	2	25	0.08	1	40.6163793

Anexo 13: Distribución de velocidades en el lazo Sur- Este.

LAZO S-E				
video_tarde				
nro muestra	distancia (m)	tiempo	m/s	
1	170	18	9.444444444	34
2	170	18.7	9.09090909	32.7272727
3	170	20.2	8.41584158	30.2970297
4	170	25.2	6.74603175	24.2857143
5	170	26	6.53846154	23.5384615
6	170	16.7	10.1796407	36.6467066
7	170	17.1	9.94152047	35.7894737
8	170	22.3	7.62331839	27.4439462
9	170	22	7.72727273	27.8181818
10	170	21.7	7.83410138	28.202765
11	170	23	7.39130435	26.6086957
12	170	18.1	9.39226519	33.8121547
13	170	17.6	9.65909091	34.7727273
14	170	18	9.444444444	34
15	170	19.2	8.85416667	31.875
16	170	15.5	10.9677419	39.483871
17	170	16.7	10.1796407	36.6467066
18	170	16.6	10.2409639	36.8674699
19	170	16.3	10.4294479	37.5460123
20	170	21.6	7.87037037	28.3333333
21	170	22.6	7.52212389	27.079646
22	170	22	7.72727273	27.8181818
23	170	22.3	7.62331839	27.4439462
24	170	19.4	8.7628866	31.5463918
25	170	20.5	8.29268293	29.8536585

conteo de frecuencias							
nro intervalo	intervalo velocidades en m/s		f	F	h	H	Veloc_Km/h
1	6.538	7.138	2	2	0.08	0.08	25.6984615
2	7.138	7.738	6	8	0.24	0.32	27.8584615
3	7.738	8.338	3	11	0.12	0.44	30.0184615
4	8.338	8.938	3	14	0.12	0.56	32.1784615
5	8.938	9.538	4	18	0.16	0.72	34.3384615
6	9.538	10.138	2	20	0.08	0.8	36.4984615
7	10.138	10.738	4	24	0.16	0.96	38.6584615
8	10.738	11.338	1	25	0.04	1	40.8184615

Anexo 14: Distribución de tiempos en la Av. Panamericana.

tiempos buses panamericana		
Bus	Tiempo (min)	Tiempo (seg)
1	3.05	180.5
2	1.14	74
3	5.28	328
4	6.22	382
5	9	540
6	7.31	451
7	3.05	180.5
8	1.14	74
9	5.28	328
10	6.22	382
11	9	540
12	7.31	451
13	3.05	180.5
14	1.14	74
15	5.28	328
16	6.22	382
17	9	540
18	7.31	451
19	3.05	180.5
20	1.14	74
21	5.28	328
22	6.22	382
23	9	540
24	7.31	451
25	3.05	180.5

conteo de frecuencias PARADEROS FORMALES PANAM							
nro intervalo	intervalos de tiempos		f	F	h	H	tiempos
1	74.000	140.500	4	4	0.16	0.16	140.500
2	140.500	207.000	5	9	0.2	0.36	207.000
3	207.000	273.500	0	9	0	0.36	273.500
4	273.500	340.000	4	13	0.16	0.52	340.000
5	340.000	406.500	4	17	0.16	0.68	406.500
6	406.500	473.000	4	21	0.16	0.84	473.000
7	473.000	539.500	0	21	0	0.84	539.500
8	539.500	606.000	4	25	0.16	1	606.000

Anexo N.15: Randomization para calibración tramo Oeste- Este.

12.266854	VISSIM JP OE
12.180041	VISSIM JP OE
12.089695	VISSIM JP OE
12.198373	VISSIM JP OE
12.038022	VISSIM JP OE
12.205043	VISSIM JP OE
12.04259	VISSIM JP OE
12.019311	VISSIM JP OE
12.142618	VISSIM JP OE
12.212185	VISSIM JP OE
12.028699	VISSIM JP OE
12.135957	VISSIM JP OE
12.05879	VISSIM JP OE
12.293376	VISSIM JP OE
12.27056	VISSIM JP OE
12.62	REAL JP OE
13.87	REAL JP OE
11.45	REAL JP OE
9.69	REAL JP OE
9.42	REAL JP OE
11.92	REAL JP OE
11.84	REAL JP OE
12.04	REAL JP OE
11.79	REAL JP OE
13.68	REAL JP OE
11.51	REAL JP OE
12.05	REAL JP OE
11.31	REAL JP OE
12.38	REAL JP OE
13.28	REAL JP OE
10.27	REAL JP OE
11.59	REAL JP OE
16.06	REAL JP OE
8.9	REAL JP OE
8.91	REAL JP OE
9.48	REAL JP OE
11.44	REAL JP OE
10.39	REAL JP OE
11.57	REAL JP OE
12.42	REAL JP OE

Anexo N.16: Randomization para calibración tramo Este- Oeste.

7.394731	vissim JP-EO
7.471968	vissim JP-EO
7.427927	vissim JP-EO
7.479953	vissim JP-EO
7.473069	vissim JP-EO
7.506257	vissim JP-EO
7.484184	vissim JP-EO
7.466817	vissim JP-EO
7.462885	vissim JP-EO
7.470794	vissim JP-EO
7.452165	vissim JP-EO
7.44217	vissim JP-EO
7.447474	vissim JP-EO
7.451057	vissim JP-EO
7.480709	vissim JP-EO
6.82	Real JP-EO
5.95	Real JP-EO
5.88	Real JP-EO
7.47	Real JP-EO
8.44	Real JP-EO
8.97	Real JP-EO
6.87	Real JP-EO
7.6	Real JP-EO
12.35	Real JP-EO
6.41	Real JP-EO
7.78	Real JP-EO
6.56	Real JP-EO
7.2	Real JP-EO
5.81	Real JP-EO
7.84	Real JP-EO
5.18	Real JP-EO
8.96	Real JP-EO
6.22	Real JP-EO
5.18	Real JP-EO
7.73	Real JP-EO
6.73	Real JP-EO
6.74	Real JP-EO
6.14	Real JP-EO
7.79	Real JP-EO
5.84	Real JP-EO

Anexo N.17: Randomization para calibración tramo Sur- Norte.

5.853938	VISSIM PANAM SN
5.771687	VISSIM PANAM SN
5.940251	VISSIM PANAM SN
6.128007	VISSIM PANAM SN
5.907613	VISSIM PANAM SN
5.92306	VISSIM PANAM SN
5.822307	VISSIM PANAM SN
6.092297	VISSIM PANAM SN
5.819274	VISSIM PANAM SN
5.930404	VISSIM PANAM SN
5.836566	VISSIM PANAM SN
5.907242	VISSIM PANAM SN
5.860996	VISSIM PANAM SN
5.854296	VISSIM PANAM SN
5.953818	VISSIM PANAM SN
5.03	REAL PANAM SN
3.47	REAL PANAM SN
3.92	REAL PANAM SN
5.51	REAL PANAM SN
5.69	REAL PANAM SN
4.65	REAL PANAM SN
4.58	REAL PANAM SN
6.94	REAL PANAM SN
5.24	REAL PANAM SN
9.63	REAL PANAM SN
7.14	REAL PANAM SN
6.02	REAL PANAM SN
4.72	REAL PANAM SN
5.16	REAL PANAM SN
5.88	REAL PANAM SN
7.2	REAL PANAM SN
3.87	REAL PANAM SN
3.86	REAL PANAM SN
4.78	REAL PANAM SN
4.91	REAL PANAM SN
4.32	REAL PANAM SN
4.25	REAL PANAM SN
8.84	REAL PANAM SN
6.73	REAL PANAM SN
4.65	REAL PANAM SN

Anexo N.18: Randomization para calibración tramo Norte- Sur.

4.849703	VISSIM PANAM NS
5.490595	VISSIM PANAM NS
4.905045	VISSIM PANAM NS
4.630453	VISSIM PANAM NS
4.697151	VISSIM PANAM NS
5.129179	VISSIM PANAM NS
4.88688	VISSIM PANAM NS
4.979206	VISSIM PANAM NS
4.833829	VISSIM PANAM NS
5.359075	VISSIM PANAM NS
4.791541	VISSIM PANAM NS
5.01797	VISSIM PANAM NS
5.316061	VISSIM PANAM NS
4.753584	VISSIM PANAM NS
4.841337	VISSIM PANAM NS
4.136	REAL PANAM NS
3.894	REAL PANAM NS
4.609	REAL PANAM NS
3.817	REAL PANAM NS
6.028	REAL PANAM NS
3.575	REAL PANAM NS
4.444	REAL PANAM NS
3.982	REAL PANAM NS
4.521	REAL PANAM NS
4.158	REAL PANAM NS
4.268	REAL PANAM NS
4.004	REAL PANAM NS
4.268	REAL PANAM NS
4.268	REAL PANAM NS
4.048	REAL PANAM NS
5.412	REAL PANAM NS
5.764	REAL PANAM NS
4.125	REAL PANAM NS
4.345	REAL PANAM NS
3.773	REAL PANAM NS
4.697	REAL PANAM NS
6.985	REAL PANAM NS
5.632	REAL PANAM NS
4.356	REAL PANAM NS
5.192	REAL PANAM NS

Anexo N.19: Tiempos de viaje para la validación.

1	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5276	12.335701	156
2	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5033	12.197125	156
3	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5215	12.368854	156
4	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5124	12.105415	156
5	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5111	12.108775	156
6	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5116	12.108916	156
7	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5162	12.279479	156
8	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5116	12.227989	156
9	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5151	12.236673	156
10	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5104	12.122711	156
11	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5177	12.158068	156
12	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5239	12.199801	156
13	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5082	12.127136	156
14	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5236	12.376288	156
15	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5156	12.237418	156
16	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5205	12.199702	156
17	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5098	12.108223	156
18	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5071	12.144105	156
19	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5095	12.171565	156
20	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5122	12.29634	156
21	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5199	12.219298	156
22	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5089	12.093577	156
23	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5098	12.173275	156
24	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5173	12.221939	156
25	600-3600	1: TRAVEL TIME JP O-E	5272	12.154953	156
1	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	3970	7.477032	93.175497
2	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4114	7.529164	93.175497
3	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4175	7.49461	93.175497
4	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4112	7.555033	93.175497
5	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4134	7.557383	93.175497
6	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4086	7.547712	93.175497
7	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4183	7.531097	93.175497
8	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	3992	7.5149	93.175497
9	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4094	7.528652	93.175497
10	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4102	7.515294	93.175497
11	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4096	7.477453	93.175497
12	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4119	7.495491	93.175497
13	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4094	7.531156	93.175497
14	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4120	7.519382	93.175497
15	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4082	7.510333	93.175497
16	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4232	7.539371	93.175497

17	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4163	7.505523	93.175497
18	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4059	7.526697	93.175497
19	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4092	7.494315	93.175497
20	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4097	7.50281	93.175497
21	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4169	7.51991	93.175497
22	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4188	7.510416	93.175497
23	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4202	7.525555	93.175497
24	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4100	7.488549	93.175497
25	600-3600	2: TRAVEL TIME JP E-O	4239	7.577704	93.175497
1	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2528	5.837184	46
2	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2473	5.787366	46
3	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2447	5.924109	46
4	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2726	6.010178	46
5	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2611	5.899643	46
6	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2492	5.915723	46
7	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2502	5.864758	46
8	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2638	5.978725	46
9	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2471	5.841144	46
10	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2616	5.966993	46
11	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2481	5.901328	46
12	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2592	5.933818	46
13	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2539	6.070043	46
14	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2565	5.836337	46
15	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2616	6.007635	46
16	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2540	5.842487	46
17	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2582	5.95207	46
18	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2503	5.914207	46
19	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2542	8.094862	46
20	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2422	5.914077	46
21	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2416	6.003004	46
22	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2583	5.899556	46
23	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2613	6.009442	46
24	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2431	5.84795	46
25	600-3600	3: TRAV_TIME_PANAM_S-N	2501	6.088763	46
1	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2378	5.233357	54.6
2	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2368	4.892487	54.6
3	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2475	4.94849	54.6
4	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2338	4.587696	54.6
5	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2271	4.553563	54.6
6	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2335	4.958154	54.6
7	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2399	4.874251	54.6
8	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2426	4.694251	54.6
9	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2479	4.935511	54.6

10	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2424	4.858662	54.6
11	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2295	4.661124	54.6
12	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2415	5.054329	54.6
13	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2352	4.827339	54.6
14	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2325	4.971056	54.6
15	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2376	4.586248	54.6
16	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2382	4.967432	54.6
17	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2448	5.081885	54.6
18	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2430	4.902783	54.6
19	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2406	4.875824	54.6
20	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2439	4.651348	54.6
21	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2403	4.708586	54.6
22	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2360	4.90053	54.6
23	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2367	4.860659	54.6
24	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2340	4.929982	54.6
25	600-3600	4: TRAV_TIME_PANAM_N-S	2370	4.818916	54.6

Anexo N.20: Tiempos de viaje para la validación tramo Javier Prado Oeste Este

12.3357	VISSIM JP OE
12.1971	VISSIM JP OE
12.3689	VISSIM JP OE
12.1054	VISSIM JP OE
12.1088	VISSIM JP OE
12.1089	VISSIM JP OE
12.2795	VISSIM JP OE
12.228	VISSIM JP OE
12.2367	VISSIM JP OE
12.1227	VISSIM JP OE
12.1581	VISSIM JP OE
12.1998	VISSIM JP OE
12.1271	VISSIM JP OE
12.3763	VISSIM JP OE
12.2374	VISSIM JP OE
12.1997	VISSIM JP OE
12.1082	VISSIM JP OE
12.1441	VISSIM JP OE
12.1716	VISSIM JP OE
12.2963	VISSIM JP OE
12.2193	VISSIM JP OE
12.0936	VISSIM JP OE
12.1733	VISSIM JP OE
12.2219	VISSIM JP OE
12.155	VISSIM JP OE
9.37	REAL JP OE
13.45	REAL JP OE
12.45	REAL JP OE
12.46	REAL JP OE
10.16	REAL JP OE
11.62	REAL JP OE
11.52	REAL JP OE
15.53	REAL JP OE
12.31	REAL JP OE
8.44	REAL JP OE
12.17	REAL JP OE
23.43	REAL JP OE
12.7	REAL JP OE
12.7	REAL JP OE
11.19	REAL JP OE
11.39	REAL JP OE
10.53	REAL JP OE
16.36	REAL JP OE
12.5	REAL JP OE
15.11	REAL JP OE
10.6	REAL JP OE
12.77	REAL JP OE
12.1	REAL JP OE
11.71	REAL JP OE
12.24	REAL JP OE

Anexo N.21: Tiempos de viaje para la validación tramo Javier Prado Este Oeste.

7.47703	vissim JP-EO
7.52916	vissim JP-EO
7.49461	vissim JP-EO
7.55503	vissim JP-EO
7.55738	vissim JP-EO
7.54771	vissim JP-EO
7.5311	vissim JP-EO
7.5149	vissim JP-EO
7.52865	vissim JP-EO
7.51529	vissim JP-EO
7.47745	vissim JP-EO
7.49549	vissim JP-EO
7.53116	vissim JP-EO
7.51938	vissim JP-EO
7.51033	vissim JP-EO
7.53937	vissim JP-EO
7.50552	vissim JP-EO
7.5267	vissim JP-EO
7.49432	vissim JP-EO
7.50281	vissim JP-EO
7.51931	vissim JP-EO
7.51042	vissim JP-EO
7.52556	vissim JP-EO
7.48855	vissim JP-EO
7.5777	vissim JP-EO
6.714	Real JP-EO
8.829	Real JP-EO
6.885	Real JP-EO
5.193	Real JP-EO
6.597	Real JP-EO
8.307	Real JP-EO
8.955	Real JP-EO
5.472	Real JP-EO
8.19	Real JP-EO
7.236	Real JP-EO
7.542	Real JP-EO
6.057	Real JP-EO
9.198	Real JP-EO
10.017	Real JP-EO
7.614	Real JP-EO
7.542	Real JP-EO
8.658	Real JP-EO
8.532	Real JP-EO
5.292	Real JP-EO
8.073	Real JP-EO
5.697	Real JP-EO
5.247	Real JP-EO
6.318	Real JP-EO
6.552	Real JP-EO
8.604	Real JP-EO

Anexo N.22: Tiempos de viaje para la validación tramo Panamericana Sur Norte.

5.83718	VISSIM PANAM SN
5.78737	VISSIM PANAM SN
5.92411	VISSIM PANAM SN
6.01018	VISSIM PANAM SN
5.89364	VISSIM PANAM SN
5.91572	VISSIM PANAM SN
5.86476	VISSIM PANAM SN
5.97873	VISSIM PANAM SN
5.84114	VISSIM PANAM SN
5.96699	VISSIM PANAM SN
5.90133	VISSIM PANAM SN
5.93382	VISSIM PANAM SN
6.07004	VISSIM PANAM SN
5.83634	VISSIM PANAM SN
6.00764	VISSIM PANAM SN
5.84249	VISSIM PANAM SN
5.95207	VISSIM PANAM SN
5.91421	VISSIM PANAM SN
8.09486	VISSIM PANAM SN
5.91408	VISSIM PANAM SN
6.003	VISSIM PANAM SN
5.89356	VISSIM PANAM SN
6.00944	VISSIM PANAM SN
5.84795	VISSIM PANAM SN
6.08876	VISSIM PANAM SN
6.363	REAL PANAM SN
7.011	REAL PANAM SN
3.717	REAL PANAM SN
5.184	REAL PANAM SN
4.248	REAL PANAM SN
7.839	REAL PANAM SN
10.782	REAL PANAM SN
6.246	REAL PANAM SN
6.183	REAL PANAM SN
6.534	REAL PANAM SN
9.594	REAL PANAM SN
7.083	REAL PANAM SN
5.067	REAL PANAM SN
5.193	REAL PANAM SN
5.769	REAL PANAM SN
5.364	REAL PANAM SN
5.652	REAL PANAM SN
8.415	REAL PANAM SN
6.282	REAL PANAM SN
6.831	REAL PANAM SN
4.473	REAL PANAM SN
6.183	REAL PANAM SN
5.823	REAL PANAM SN
3.936	REAL PANAM SN
5.004	REAL PANAM SN

Anexo N.23: Tiempos de viaje para la validación tramo Panamericana Norte Sur.

5.23336	VISSIM PANAM NS
4.89249	VISSIM PANAM NS
4.94849	VISSIM PANAM NS
4.5877	VISSIM PANAM NS
4.55356	VISSIM PANAM NS
4.95815	VISSIM PANAM NS
4.87425	VISSIM PANAM NS
4.69425	VISSIM PANAM NS
4.93551	VISSIM PANAM NS
4.85866	VISSIM PANAM NS
4.66112	VISSIM PANAM NS
5.05433	VISSIM PANAM NS
4.82734	VISSIM PANAM NS
4.97106	VISSIM PANAM NS
4.58625	VISSIM PANAM NS
4.96743	VISSIM PANAM NS
5.08189	VISSIM PANAM NS
4.90278	VISSIM PANAM NS
4.87582	VISSIM PANAM NS
4.65135	VISSIM PANAM NS
4.70859	VISSIM PANAM NS
4.90053	VISSIM PANAM NS
4.86066	VISSIM PANAM NS
4.92998	VISSIM PANAM NS
4.81892	VISSIM PANAM NS
3.92	REAL PANAM NS
3.99	REAL PANAM NS
3.93	REAL PANAM NS
4	REAL PANAM NS
4.2	REAL PANAM NS
4.06	REAL PANAM NS
3.79	REAL PANAM NS
4.27	REAL PANAM NS
4.72	REAL PANAM NS
6.75	REAL PANAM NS
7.25	REAL PANAM NS
5.1	REAL PANAM NS
4.31	REAL PANAM NS
4.26	REAL PANAM NS
4.85	REAL PANAM NS
4.58	REAL PANAM NS
7.52	REAL PANAM NS
5.43	REAL PANAM NS
8.97	REAL PANAM NS
5.63	REAL PANAM NS
3.87	REAL PANAM NS
4.45	REAL PANAM NS
3.47	REAL PANAM NS
4.64	REAL PANAM NS
4.07	REAL PANAM NS

Anexo N.24: Programación Lazo Javier Prado Este- Panamericana Norte

PARAMETERS	Gen	Prog 1	Prog 2	Prog 3	Prog 4	Prog 5	Prog 6	Prog 7	Prog 8	Comment
DT		1	1							Evaluation interval [min]
MAX_LANE	2									
KR	70									
OCC_OPT	0.3									

ARRAYS	Dim2	Dim1	[1]	Comment
detNo	2	1	100	detector no. on main link, lane 1
detNo[2]			101	detector no. on main link, lane 2

EXPRESSIONS	Contents	Comment
Demand	Detection(1)	

Anexo N.25: Programación Lazo Javier Prado Este - Panamericana Sur

Anexo N.25: Programación Lazo Javier Prado Oeste - Panamericana Sur

PARAMETERS	Gen	Prog 1	Prog 2	Prog 3	Prog 4	Prog 5	Prog 6	Prog 7	Prog 8	Comment
DT		1	1							Evaluation interval [min]
MAX_LANE	3									
KR	80									
OCC_OPT	0.31									

ARRAYS	Dim2	Dim1	[1]	Comment
detNo	3	1	120	detector no. on main link, lane 1
detNo[2]			121	detector no. on main link, lane 2
detNo[3]			122	detector no. on main link, lane 3

EXPRESSIONS	Contents	Comment
Demand	Detection(3)	