UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de un modelo con velocidad variable como mejora de la congestión
vehicular en la vía expresa Javier Prado, entre el óvalo Monitor Huáscar y
Paseo de la República

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Assina Flores, Walter Fausto (0000-0002-8337-1290)

Masías Saldarriaga, Juan Diego (0000-0002-7908-300X)

ASESOR

Bravo Lizano, Aldo Rafael (0000-0003-4835-795X)

Lima, 17 de enero de 2020

DEDICATORIA

*A Dios, nuestras familias y amigos por el apoyo incondicional brindado durante toda
nuestra carrera universitaria*

RESUMEN

La congestión vehicular es uno de los problemas que más afecta la calidad de vida en la ciudad de Lima y demás ciudades del mundo, aumentando los tiempos de viajes, generando pérdidas económicas, y contaminando el planeta, ante ello es importante buscar soluciones que permitan mitigar dichos problemas mencionados anteriormente.

El sistema de velocidad variable es una herramienta de gestión del tránsito enfocada disminuir los límites de velocidad permitidos en una vía analizando el flujo de vehículos que recorren la vía, principalmente en horas pico, para asegurar un flujo continuo y evitar la formación de cuellos de botella y colas a lo largo de la vía.

El presente proyecto de tesis tiene como objetivo principal evaluar los beneficios que se obtienen al aplicar el sistema de velocidad variable en la vía expresa Javier Prado, entre el óvalo Monitor Huáscar y la avenida Paseo de la República en la ciudad de Lima. Para ello, se realizó una comparación del comportamiento del tráfico haciendo uso del sistema de velocidad variable y el comportamiento del tráfico bajo la situación actual.

Comparando las densidades obtenidas durante los aforos realizados y la simulación, se obtuvo una reducción en el tiempo de viaje considerable, mejorando el comportamiento de la vía en toda su extensión y homogenizando el flujo vehicular.

Se comprobó que la velocidad variable, es una herramienta a considerada en vías de libre tránsito que permite mejorar el comportamiento de tránsito sin alterar el diseño geométrico de la misma.

Palabras Clave: Límites de velocidad variable, congestión vehicular, simulación de tráfico, densidad.

Proposal for a model with variable speed limits to improve vehicular congestion on the Javier Prado expressway, between the Oval Monitor Huáscar and Paseo de la República

ABSTRACT

Traffic congestion is one of the problems that most affects the quality of life in the city of Lima, increasing travel times and generating economic losses, and polluting the planet; before it is important

The variable speed system is a traffic management tool focused on decreasing the speed limits allowed in a road by analyzing the flow of vehicles that travel the road, mainly during peak hours, to ensure a continuous flow and avoid the formation of bottlenecks and queues along the road.

The main objective of this thesis project is to evaluate the benefits obtained by applying the variable speed system in the expressway Javier Prado, between the Monitor Huáscar oval and Paseo de la República avenue in the city of Lima. To do this, a comparison of traffic behavior was made using the variable speed system and the traffic behavior under the current situation.

Comparing the densities obtained during the gauging carried out and the simulation, a reduction in the considerable travel time was obtained, improving the behavior of the road in all its extension and homogenizing the vehicular flow.

It was found that variable speed is a tool to be considered in free traffic routes that allows improving traffic behavior without altering the geometric design of it.

Keywords: Variable speed limits, vehicular congestion, traffic simulation, density.

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	REALIDAD PROBLEMÁTICA	1
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3	HIPÓTESIS	5
1.4	OBJETIVO GENERAL	5
1.5	OBJETIVO ESPECÍFICO	5
1.6	INDICADORES DE LOGRO	6
1.7	ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	7
2	MARCO TEÓRICO	8
2.1	GENERALIDADES	8
2.2	GLOSARIO DE TÉRMINOS	8
2.3	GESTIÓN DEL TRÁFICO	9
2.3.1	Congestión vehicular	9
2.3.2	Señalización del tráfico	10
2.3.3	Centros de gestión del tráfico	11
2.4	VELOCIDAD VARIABLE	12
2.4.1	Introducción	12
2.4.2	Objetivos	13
2.4.3	Clasificación de límites de velocidad variable	14
2.4.4	Velocidad variable en otros países	15
2.5	SIMULACIÓN DEL TRÁFICO	17
2.6	ESTUDIO DE VELOCIDADES	21
2.6.1	Velocidad promedio de viaje	21
2.6.2	Estudio de velocidad de punto	22
2.6.3	Procedimiento para el análisis de datos en estudios de punto	24
2.6.4	Estudio de velocidad de recorrido	27
2.6.5	Procedimiento para el análisis de datos en estudios de punto	28
2.7	TECNOLOGÍAS DE MONITORIZACIÓN	28
2.7.1	Monitorización intrusiva	29
2.7.2	Monitorización no intrusiva	29

3	DESCRIPCION DEL CASO DE ESTUDIO	31
3.1	SEÑALIZACIÓN	32
3.2	ANCHO DE CARRIL	33
3.3	NÚMERO DE CARRILES	33
3.4	LÍMITE DE VELOCIDAD	43
3.5	ACCESOS Y SALIDAS EN LA VÍA EXPRESA JAVIER PRADO.....	43
3.6	POSIBLES PUNTOS CRÍTICOS	47
4	TRATAMIENTO DE DATOS	52
4.1	PRESENTACIÓN DE BASE DE DATOS	52
4.1.1	Primer aforo	53
4.2	AFORO DE VELOCIDADES	56
5	CONSTRUCCIÓN DE RED VIAL EN AIMSUN	57
5.1	PRESENTACIÓN DEL PLANO A INTRODUCIR EN SOFTWARE	57
5.2	INTRODUCCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA VÍA	57
5.3	INTRODUCCIÓN DE ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LA VÍA	59
5.4	PARÁMETROS DEL TRÁFICO	61
6	SIMULACIÓN SIN VELOCIDAD VARIABLE	62
6.1	VARIABLES LOCALES	63
6.2	VARIABLES GLOBALES	65
6.3	SIMULACIÓN DE CASO CON FLUJO ELEVADO	66
6.3.1	Tránsito Existente (TE):	67
6.4	CRECIMIENTO NORMAL DEL TRÁNSITO (CNT)	67
7	SIMULACIÓN CON VELOCIDAD VARIABLE	71
8	RESULTADOS Y ANÁLISIS POR TRAMOS	73
8.1	PRIMER TRAMO	73
8.2	SEGUNDO TRAMO.....	74
8.3	TERCER TRAMO	75
8.4	CUARTO TRAMO	76
9	CONSIDERACIONES PARA MECANISMOS DE GESTIÓN DE TRÁFICO.	78

9.1	EDUCACIÓN VIAL.....	78
9.2	INFRAESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO	79
10	CONCLUSIONES	81
11	RECOMENDACIONES	82
12	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	83
13	ANEXOS	87
13.1	LONGITUD DE LA VÍA Y TIEMPO DE TRASLADO SIN TRAFICO	87
13.3	PROPUESTA DE INFRAESTRUCTURA DE VELOCIDAD VARIABLE PLANTEADA.....	88
13.4	AFORO DE VEHÍCULOS	89
13.4.1	Sentido Oeste – Este: Horario Noche Noche.....	89
13.4.2	Sentido Este – Oeste: Horario Noche	90
13.5	AFORO DE VELOCIDADES	91
13.5.1	Sentido Oeste - Este.....	91
13.5.2	Sentido Este - Oeste.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Indicadores de logro	6
Tabla 2: Distribución de velocidades en estudios de punto.....	24
Tabla 3: Números de tamaño de clase por tamaño de muestra.	24
Tabla 4: Distribución de frecuencia en velocidad de punto	26
Tabla 5: Tiempo de recorrido	28
Tabla 6: Aforo sentido Oeste a Este.	53
Tabla 7: Aforo sentido Este a Oeste	54
Tabla 8: Resultados globales de simulación sin velocidad variable.....	65
Tabla 9: Tabla de crecimiento poblacional de la ciudad de Lima	67
Tabla 10: Tabla de crecimiento vehicular.	68
Tabla 11: Cálculo de población al año 2022	68
Tabla 12: Resultados de simulación con flujo elevado	69
Tabla 13: Resultados de simulación con velocidad variable.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribución de viajes durante el día. Fuente: JICA, 2013.	1
Figura 2: Capacidad vial en sentido Este - Oeste. Fuente: Santa María y otros, 2014.....	3
Figura 3: Capacidad vial en sentido Oeste - Este. Fuente: Santa María y otros, 2014.....	3
Figura 4: Velocidad promedio sentido Oeste - Este. Fuente: Santa María y otros, 2014.....	4
Figura 5: Velocidad promedio sentido Este - Oeste. Fuente: Santa María y otros, 2014.....	4
Figura 6: Centro de gestión del tráfico. Fuente: Google	12
Figura 7: Sistema de velocidad variable aplicado en Estados Unidos. Fuente: TAMU.....	13
Figura 8: Niveles de simulación. Fuente: Moyano.....	19
Figura 9: Método de detectores de neumáticos y registrador. Fuente: Cal y Mayor.....	23
Figura 10: Tramo de avenida Javier Prado a analizar. Fuente: Propia	31
Figura 11: Señales informativas en la vía. Fuente: Propia	32
Figura 12: Resaltos existentes para el control de velocidad. Fuente: Propia	33
Figura 13: Aumento de carril a la altura del óvalo Monitor Huáscar.....	34
Figura 14: Visualización de los 5 carriles existentes a la altura del Óvalo Monitor Huáscar. Fuente: Propia.....	34
Figura 15: Reducción de carril debido a pilar del puente peatonal. Fuente: Propia.....	35
Figura 16: Reducción de carriles de la vía a 3. Fuente: Propia.	35
Figura 17: Aumento de carriles a 4. Fuente: Propia.	36
Figura 18: Ingreso de vehículos a partir de la vía Evitamiento. Fuente: Propia.	36
Figura 19: Reducción de carriles por salida hacia la Panamericana Sur. Fuente: Propia....	37
Figura 20: Aumento de carriles por entrada auxiliar de la vía expresa Javier Prado. Fuente: Propia.....	37
Figura 21: Reducción del número de carriles para la vía expresa Javier Prado. Fuente: Propia.....	38
Figura 22: Reducción en el número de carriles por rampa para la salida de la vía expresa Javier Prado. Fuente: Propia.....	39
Figura 23: Aumento en el número de carriles por rampa proveniente de la auxiliar vía expresa Javier Prado. Fuente: Propia.....	39
Figura 24: Reducción en el número de carriles por división de la vía expresa Javier Prado y auxiliar. Fuente: Propia	40
Figura 25: División de avenida Javier Prado y cruce con la avenida Las Begonias. Fuente: Propia.....	41

Figura 26: Vía expresa Javier Prado con un total de número de carriles de 3. Fuente: Propia.....	42
Figura 27: Vía expresa Javier Prado con presencia de paradero. Fuente: Propia.....	42
Figura 28: Vía expresa Javier Prado con un total de 4 carriles. Fuente: Propia.....	42
Figura 29: Límites de velocidad existentes en la vía. Fuente: Propia.	43
Figura 30: Accesos y salidas a la altura de la vía Evitamiento. Fuente: Propia.	44
Figura 31: Accesos y salidas a la altura de la avenida Circunvalación. Fuente: Propia.....	44
Figura 32: Accesos y salidas a la altura de la avenida San Luis. Fuente: Propia.	45
Figura 33: Accesos y salidas a la altura de la avenida Aviación. Fuente: Propia.	45
Figura 34: Accesos y salidas a la altura de la avenida José Gálvez Barrenechea. Fuente: Propia.....	46
Figura 35: Accesos y salidas a la altura de la avenida Paseo de la República. Fuente: Propia.....	46
Figura 36: Congestión vehicular a la altura del Jockey Plaza. Fuente: Propia.....	47
Figura 37: Primer posible punto crítico identificado, ubicado alrededor de la Universidad de Lima. Fuente: Propia.	48
Figura 38: Posible punto crítico ubicado a la altura de la vía Evitamiento. Fuente: Propia.	48
Figura 39: Posible punto crítico por invasión de carril. Fuente: Propia.	49
Figura 40: Punto crítico a la altura del Instituto de la Mujer. Fuente: Propia.	49
Figura 41: Punto crítico a la altura de la avenida San Luis. Fuente: Propia.....	50
Figura 42: Punto crítico a la altura de la avenida San Luis. Fuente: Propia.....	50
Figura 43: Punto crítico a la altura de la avenida Circunvalación y vía Evitamiento. Fuente: Propia.....	51
Figura 44: Punto crítico a la altura del óvalo Monitor Huáscar. Fuente: Propia.	51
Figura 45: Puntos de aforo elegidos para la investigación. Fuente: Propia.....	53
Figura 46: Representación gráfica de vehículos contabilizados, sentido Oeste a Este. Fuente: Propia.....	54
Figura 47: Representación gráfica de vehículos contabilizados, sentido Este a Oeste. Fuente: Propia.....	55
Figura 48: Aforo de Velocidades Sentido Este – Oeste. Fuente: Propia.....	56
Figura 49: Aforo de Velocidades Sentido Oeste – Este. Fuente: Propia.....	56
Figura 50: Ingreso de tipo de vía y límite de velocidad. Fuente: Propia.....	58

Figura 51: Ingreso de ancho de carril. Fuente: Propia.....	58
Figura 52: Características del vehículo para la simulación. Fuente: Propia.....	59
Figura 53: Características del vehículo para la simulación. Fuente: Propia.....	60
Figura 54: Comportamiento cambio de carril. Fuente: Propia.	60
Figura 55: Simulación de la vía expresa Javier Prado en el programa Aimsun. Fuente: Propia.....	62
Figura 56: Gráfica de densidad para el tramo 3. Fuente: Propia.	63
Figura 57: Gráfica de flujo para el tramo 3. Fuente: Propia.....	64
Figura 58: Gráfica Velocidad. Fuente: Propia.....	64
Figura 59: Gráfica Densidad (veh/km). Fuente: Propia.	65
Figura 60: Gráfica Densidad. Fuente: Propia.	69
Figura 61: Gráfica Flujo. Fuente: Propia.....	70
Figura 62: Gráfica velocidad. Fuente: Propia.....	70
Figura 63: División por tramos de la vía de estudio. Fuente: Propia.	73
Figura 64: Gráfica densidad. Fuente: Propia.	73
Figura 65: Gráfica Flujo. Fuente: Propia.....	74
Figura 66: Gráfica densidad. Fuente: Propia.	74
Figura 67: Gráfica flujo. Fuente: Propia.....	75
Figura 68: Gráfica densidad. Fuente: Propia.	75
Figura 69: Gráfica flujo. Fuente: Propia.....	76
Figura 70: Gráfica densidad. Fuente: Propia.	76
Figura 71: Gráfica flujo. Fuente: Propia.....	77

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

La bonanza económica que ha vivido el Perú durante los últimos 12 años ha fomentado un crecimiento en la adquisición de vehículos; de acuerdo con cifras de la Comunidad Andina, entre los años 2004 y 2013 el parque vehicular en el país se incrementó en 63% aproximadamente (Diario Gestión, 2014). De todo el parque vehicular existente, la ciudad de Lima posee el 66 % de todo el parque automotor peruano (Escorza, 2016, p.7).

Dicha cantidad de viajes no deriva solo del deseo intrínseco de desplazarse; generalmente, responde a la necesidad de movilizarse a diferentes lugares de la ciudad para realizar distintas actividades como: estudio, trabajo, recreación, etc. La siguiente imagen muestra la distribución de viaje durante un día:

Figura 1: Distribución de viajes durante el día. Fuente: JICA, 2013.

En la figura 1 se observa, que la mayor cantidad de viajes se dan entre las 7:00 a 9:00 am, agrupando el 25% de todos los viajes diarios y siendo los distritos de Cercado de Lima, Miraflores y San Isidro los que más viajes atraen. La gran mayoría de esos viajes proviene de las zonas periféricas de la ciudad como Comas, La Molina y San Juan de Lurigancho. Para ello, es necesaria una eficiente planificación urbana que permita trasladarnos a grandes distancias en el menor tiempo posible (Escorza, 2016, p.9).

Sin embargo, la infraestructura vial de la ciudad mantiene la misma estructura de hace varias décadas. Esta situación genera accidentes, contaminación y congestión vehicular en la ciudad. De acuerdo con estudios realizados, Lima por la congestión pierde anualmente 13 mil millones de soles, produce 650 mil toneladas de CO₂ y se desperdician

aproximadamente mil millones de galones de combustible (Radio programas del Perú, 2014). Todo ese dinero perdido podría ser utilizado en la implementación de un sistema integrado de transporte, mejoras en la infraestructura vial y purificación de la calidad de aire de la ciudad, mejorando la calidad de vida de los limeños.

El problema de la congestión vehicular se ve reflejada en el tiempo necesario para trasladarse hacia su centro laboral o de estudio; de acuerdo con Lima Cómo Vamos, los limeños para trasladarse se demoran los siguientes tiempos: 42% media hora, 32.6% entre media hora y una hora, 15.5% de una hora a hora y media, finalmente, el 9.8% demora más de hora y media (Lima como vamos, 2015, p.9). Dichos valores representan únicamente los tiempos de ida, al considerar los tiempos totales por día se observa que un 10% de personas debe destinar más de tres horas para llegar a su destino principal (Lima como vamos, 2015, p.9). Del mismo modo, estudios indican que la velocidad en las denominadas horas pico en las principales avenidas de la ciudad es menor a 20 km/h (Santa María, 2014, p.1).

Por tal motivo, es necesario no solo mejorar la infraestructura vial de la ciudad en algunas zonas, también es importante mejorar la deficiente gestión del tráfico que existe en Lima. Ante ello, como opción de solución es posible utilizar un sistema de velocidad variable. Un sistema de velocidad variable es un sistema inteligente de transporte que permite establecer diferentes límites de velocidad a lo largo de una vía de acuerdo con las condiciones en que se encuentre; analizando el volumen de tránsito, las condiciones meteorológicas, el impacto ambiental y posibles problemas en el que se involucre la seguridad vial; para así poder determinar los límites de velocidad más apropiado para cada situación diferente que se presente.

El sistema de velocidad variable recolecta información tanto de la infraestructura, vehículos y usuarios para poder proporcionar un sistema de transporte adecuado, seguro, eficaz y sostenible que permita reducir las pérdidas de tiempo estancado, además de pérdidas económicas y contribuir con el impacto ambiental producidos por el parque automotor.

Para la investigación a realizar se ha elegido como caso de estudio la vía expresa Javier Prado. La vía expresa Javier Prado es una de las avenidas más importantes en la ciudad de Lima, principalmente por la gran extensión que comprende y la cantidad de distritos por

los que pasa. Es la principal vía de salida del distrito de La Molina hacia la zona central de la ciudad y conecta los distritos de San Isidro, San Borja y Surco, distritos con gran cantidad de oficinas.

Estadísticas encontradas correspondientes a la avenida indican que la demanda diaria de vehículos que circulan en sentido Este – Oeste es de 135,400 vehículos, de los cuales el 20% transitan en hora punta (Santa María, Flores, Coarita, Valero & Montenegro, 2014, p.4). Para el sentido Oeste – Este, la demanda es de 114,300 vehículos y el 25% transita en hora punta.

En conjunto, la avenida presenta una capacidad de vía dependiendo de la cantidad de carriles existentes y sus parámetros geométricos; las ilustraciones 2 y 3 muestran la capacidad de la vía para cada sentido:

Figura 2: Capacidad vial en sentido Este - Oeste. Fuente: Santa María y otros, 2014.

Figura 3: Capacidad vial en sentido Oeste - Este. Fuente: Santa María y otros, 2014

La combinación de la demanda y la capacidad de la vía permite determinar la velocidad promedio correspondiente al sentido observado, tal como lo muestran las ilustraciones 4 y 5:

Figura 4: Velocidad promedio sentido Oeste - Este. Fuente: Santa María y otros, 2014.

Figura 5: Velocidad promedio sentido Este - Oeste. Fuente: Santa María y otros, 2014.

A partir de las ilustraciones es posible observar que, a pesar de ser catalogada como una vía de tránsito rápido, en hora punta se tienen velocidades de 20 km/h, valor muy por debajo de lo esperado, obteniendo un nivel de servicio tipo F para la avenida (Santa María, Flores, Coarita, Valero & Montenegro, 2014, p.4)

1.2 Formulación del problema

Ante toda la problemática presentada, el alcance del proyecto se centrará en el análisis del tránsito de la vía a analizar, dicha vía será la vía expresa Javier Prado, delimitada entre el Óvalo Monitor Huáscar y la avenida Paseo de la República. Dicho tramo posee una longitud de seis kilómetros de longitud aproximadamente y cruza los distritos de San

Isidro, La Victoria, San Borja y Santiago de Surco. Adicionalmente, la presente tesis busca dar respuesta a la siguiente pregunta:

- ¿Únicamente por una mala gestión del tránsito se genera el congestionamiento de la vía en las denominadas horas punta?

1.3 Hipótesis

El sistema de velocidad variable para la vía expresa de Javier Prado es una alternativa adecuada para disminuir el impacto de congestión generada entre el óvalo Monitor Huáscar y Paseo de la República.

1.4 Objetivo General

Proponer un modelo de velocidad variable en la vía expresa de Javier Prado simulando el comportamiento de la congestión en el software Aimsun para mejorar la congestión vehicular existente.

1.5 Objetivo Específico

- a) Desarrollar los conceptos relacionados con la velocidad variable y su uso como herramienta de gestión del tráfico.
- b) Identificar los horarios y puntos de congestión vehicular dentro de la zona de estudio.
- c) Determinar la cantidad de vehículos que transitan en la vía en la hora más congestionada.
- d) Describir los aspectos más importantes para el uso de la herramienta Aimsun, durante la modelación de la vía, ingreso de parámetros del tráfico y simulación, aplicando un modelo microscópico.
- e) Cuantificar los beneficios relacionados al comportamiento de la congestión vehicular encontrados al aplicar un sistema de velocidad variable en la vía expresa de Javier Prado
- f) Describir las condiciones mínimas a tener en cuenta para implementar mecanismos de gestión de tráfico a futuro en la ciudad.

1.6 Indicadores de Logro

Tabla 1: Indicadores de logro

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	LOGROS
Desarrollar los conceptos relacionados con la velocidad variable y su uso como herramienta de gestión del tráfico.	Revisar la bibliografía respecto a velocidad variable y su correcta aplicación	Reconocer los beneficios de la velocidad variable como herramienta de gestión del tráfico.
Identificar los horarios y puntos de congestión vehicular dentro de la zona de estudio.	Analizar los datos recolectados correspondientes al flujo vehicular.	Conocer los tramos más críticos existentes en el caso de estudio.
Determinar la cantidad de vehículos que transitan en la vía en un horario determinado.	Desarrollar los aforos correspondientes para el horario correspondiente.	Contabilizar la cantidad de vehículos que transitan para los horarios de mayor congestión vehicular.
Describir los aspectos más importantes para el uso de la herramienta Aimsun durante la modelación de la vía, ingreso de parámetros del tráfico y simulación, aplicando un modelo microscópico.	Analizar los parámetros más importantes, para el ingreso de los mismos en el programa Aimsun.	Modelar el caso de estudio, para así obtener los resultados de la simulación bajo los parámetros anteriormente mencionados
Cuantificar los beneficios relacionados al comportamiento de la congestión vehicular encontrados al aplicar un sistema de velocidad variable en la vía expresa de Javier Prado.	Analizar los beneficios encontrados correspondientes al aplicar el sistema de velocidad variable	Conocer los beneficios encontrados de aplicar el sistema de velocidad variable para el caso de estudio.
Describir las condiciones mínimas para tener en cuenta para implementar mecanismos de gestión de tráfico a futuro en la ciudad.	Analizar y describir la infraestructura necesaria en la vía para el correcto funcionamiento del sistema en la vía.	Reconocer los beneficios de implementar los mecanismos de gestión del tráfico.

1.7 Alcances y limitaciones de la investigación

El análisis del proyecto se centra en el análisis de la movilidad vehicular en la vía a partir de los datos de flujo de vehículos, la creación de un modelo de vía mediante el software Aimsun, sobre el cual se han realizado las simulaciones; un análisis de los resultados de las simulaciones en el cual se valoran los beneficios relacionados a la congestión vehicular que se obtienen con la utilización del sistema de velocidad variable, y finalmente, establecer la infraestructura necesaria para la implementación de un sistema de control en la vía.

Quedan fuera del alcance aspectos referentes a los beneficios obtenidos en seguridad vial y reducción de contaminación, así como la implementación del sistema y su costo, puesto que, se trata principalmente de un análisis que verifique que a través de un modelo de velocidad variable es posible mejorar el comportamiento del tráfico respecto a la situación actual que presenta la vía.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

Se definen algunos conceptos básicos necesarios como introducción al lector del documento. Seguidamente, se describe de manera más específica los principales temas de los que trata la presente investigación, principalmente respecto a la gestión del tráfico y la velocidad variable. Finalmente, se explicarán los softwares de simulación existentes y Aimsun como software elegido para el desarrollo de la investigación.

2.2 Glosario de términos

a) Congestión Vehicular

Condición en que existen muchos vehículos circulando en una vía y cada uno de ellos avanza lenta e irregularmente. La causa fundamental de la congestión es la fricción entre los vehículos en el flujo de tránsito. Hasta un cierto nivel de tránsito, los vehículos pueden circular a una velocidad relativamente libre, determinada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etc. Sin embargo, a volúmenes mayores, cada vehículo adicional estorba el desplazamiento de los demás, es decir, comienza el fenómeno de la congestión.

b) Flujo vehicular

El tránsito vehicular (también llamado tráfico vehicular, o simplemente tráfico) es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Antes de cualquier diseño geométrico de una vía se deben conocer las características del tránsito que va a ocupar esa carretera o calle. El análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite determinar el nivel de eficiencia de la operación.

c) Densidad

Es el número de vehículos que ocupan una longitud específica de vía en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km) ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada.

La densidad está relacionada directamente con dos variables, las cuales son, el espaciamiento simple y espaciamiento promedio. Para ello, el espaciamiento simple es la distancia entre dos vehículos medidos desde la defensa lateral de ambos vehículos.

El espaciamiento promedio, es el promedio de los espaciamientos simples existentes entre los vehículos que circular por parte de la vía (Cal y Mayor, 2007, p.283).

d) Simulación

La simulación es una herramienta utilizada para resolver problemas dinámicos que puede mostrar los resultados de forma gráfica, que proporcionan una idea visual de lo que ocurre en la realidad, y de forma analítica, que proporciona una descripción cuantitativa.

e) Sistemas inteligentes de transporte

Los sistemas inteligentes de transportes (ITS) representa la integración de tecnologías de comunicaciones electrónicas con el objetivo de mejorar la movilidad, seguridad vial y eficiencia del transporte, mejorando así la funcionalidad de los vehículos y las vías.

f) Vía expresa

Autopista especial de tránsito rápido de gran amplitud, que es utilizada exclusivamente para el tránsito vehicular en ambas direcciones, con pocas vías de acceso y sin intersecciones.

2.3 Gestión del tráfico

La gestión del tráfico tiene como propósito el manejo eficiente y seguro de los flujos vehiculares en el sistema vial, a fin de que los desplazamientos origen-destino se realicen en los menores tiempos de viaje posibles, en condiciones de seguridad adecuadas, procurando producir los menores impactos negativos al medio ambiente. Estos atributos están relacionados directamente con las características operacionales o niveles de servicio de las vías, las cuales a su vez dependen de los elementos y medidas de regulación y control (PMM, 2009, p.37).

2.3.1 Congestión vehicular

El nivel de congestión vehicular, problema principal que persiste en las vías de la ciudad de Lima, registran niveles de saturación que han superado la demanda o capacidad física de las vías a lo largo de su trayectoria, principalmente en las vías que presentan reducciones en el número de carriles, entradas y salidas por auxiliares o alimentadores que se concentran en una vía principal.

La situación tiende a empeorar debido a la presencia de paradas inapropiadas por parte del transporte público, cruce de peatones, deficiente geometría vial, dispositivos de control del tráfico poco eficientes como los semáforos, reductores de velocidad, etc., aspectos que inciden directamente con el incremento de la congestión vehicular.

2.3.2 Señalización del tráfico

La señalización es parte esencial e indispensable, la ausencia de estos dispositivos de control implica que una vía no entre en funcionamiento. Estas señalizaciones tienen como función la de informar, advertir, prevenir y reglamentar a los usuarios, para evitar problemas y/o accidentes dentro de la vía.

Dentro de la señalización del tráfico, se puede subdividir en dos grandes grupos, están las señalizaciones horizontales, como también las señalizaciones verticales, las cuales serán debidamente explicadas y diferenciadas a continuación.

2.3.2.1 Señalización horizontal

De acuerdo con el Manual de Dispositivos de Control de Tránsito Automotor para Calles y Carreteras la señalización horizontal puede ser definida de la siguiente manera:

“Las marcas en el pavimento o demarcaciones, constituyen parte de la señalización horizontal y está conformada por marcas planas en el pavimento, tales como líneas horizontales y transversales, flechas, símbolos y letras, que se aplican o adhieren sobre el pavimento, sardineles, otras estructuras de la vía y zonas adyacentes”. (MTC, 2016)

Las señalizaciones horizontales se emplean para reglamentar la circulación, advertir y guiar a los usuarios de la vía, por lo que constituyen un elemento indispensable para la operación vehicular y seguridad

2.3.2.2 Señalización vertical

Las señales verticales son dispositivos instalados al costado o sobre el camino, y tienen como propósito, reglamentar el tránsito y comunicar a los usuarios mediante palabras o símbolos. Su uso es fundamental, primordialmente en lugares donde existen regulaciones especiales, permanentes o temporales, y en aquellos donde los peligros no siempre son evidentes. Dependiendo de la función que desempeñan se clasifican en 3 grupos (MTC, 2016):

a) Señales Reguladoras o de Reglamentación:

Tienen por finalidad informar a los usuarios de las vías, las prioridades, prohibiciones, restricciones, obligaciones y autorizaciones existentes, en el uso de las vías. Su incumplimiento constituye una falta que puede acarrear un delito (MTC, 2016, p.13).

b) Señales de Prevención:

Su propósito es advertir a los usuarios sobre la existencia y naturaleza de riesgos y/o situaciones imprevistas presentes en la vía o en sus zonas adyacentes, ya sea en forma permanente o temporal (MTC, 2016, p.13).

c) Señales de Información:

Tienen como propósito guiar a los usuarios y proporcionarles información para que puedan llegar a sus destinos en la forma más simple y directa posible. Además, proporcionan información relativa a distancias a centros poblados y de servicios al usuario, kilometrajes de rutas, nombres de calles, lugares de interés turístico, y otros (MTC, 2016, p.13).

2.3.3 Centros de gestión del tráfico

Los centros de gestión del tráfico son las unidades responsables de todas las tareas de control y supervisión en la circulación, asistencia e información a los usuarios de la vía, y que centralizan la recepción de todos aquellos datos e información que reciben. De tal forma, es posible gestionar el tráfico e informar a los usuarios antes y durante su viaje con la atención telefónica y radio (Circula Seguro, 2012). Las funciones de los centros de gestión del tráfico son las siguientes:

- a) Gestión y control del tráfico interurbano, sobre todo en los accesos a las grandes ciudades para mejorar la fluidez del tráfico en los puntos más conflictivos. Especial atención a las actuaciones en operaciones especiales por días festivos y vacaciones, así como información sobre rutas alternativas y situación de la red viaria (Circula Seguro, 2012).
- b) Proporcionar información y asistencia a los usuarios de la red viaria una vez recopilada toda la información que puede ser de interés para la gestión del tráfico sobre: meteorología, estado de las carreteras, incidencias sobre obras o cortes de

carreteras, restricciones de vehículos, etcétera. Todo ello coordinado con los medios de comunicación (Circula Seguro, 2012).

- c) Reducir la siniestralidad, investigando las condiciones de la vía y sus incidencias meteorológicas, coordinando las operaciones de auxilio en caso de incidente o accidente, autorizar las obras, pruebas, así como las restricciones de circulación, etcétera (Circula Seguro, 2012).

Figura 6: Centro de gestión del tráfico. Fuente: Google

En la figura 6, se puede observar cómo es un centro de gestión del tráfico, como están distribuidos tanto los equipos como las cámaras, así también las actividades que cada persona desarrolla para controlar de manera efectiva el tránsito vehicular.

2.4 Velocidad Variable

2.4.1 Introducción

El sistema de velocidad variable es un sistema inteligente de transporte (ITS) que determina los límites de velocidad más apropiados para una vía a partir del análisis de las condiciones que esta presenta (principalmente congestión vehicular y condiciones meteorológicas).

Estableciendo los diferentes límites de velocidad el sistema permite: la reducción de la congestión del tráfico, mantener el flujo del tránsito uniforme a medida que permita reducir el impacto del stop-and-go (detenerse y avanzar), mejorar la seguridad vial y la disminución de la contaminación, lo cual va ligado a una mejora de la calidad del aire.

Estadísticas en ciudades donde se ha implementado muestran resultados favorables, generando reducciones de congestiones, accidentes y contaminación entre un 12% y 35% (Deyá, 2012, p.7).

Figura 7: Sistema de velocidad variable aplicado en Estados Unidos. Fuente: TAMU

La figura 7 muestra las señalizaciones luminosas, que de acuerdo con el estado en la que se encuentre la vía se determinará una velocidad, esta puede ser por tramo como también por carriles.

2.4.2 Objetivos

Como se ha mencionado, los objetivos del sistema de velocidad variable se encuentran directamente relacionados entre sí, los cuales se detallarán a continuación:

a) Reducción de congestiones

El principal objetivo del sistema de velocidad variable es reducir el tiempo de congestión y ocupar menos longitud a lo largo de la vía, y de esta manera reducir también las paradas y arranques de los vehículos.

b) Mejora de la seguridad vial

Con el control dinámico de la velocidad se consigue una reducción de los accidentes primarios y secundarios durante la congestión. Al establecer velocidades más estables se reduce la probabilidad de algún movimiento radical de parte de los conductores, del mismo modo un límite de velocidad menor minimiza la severidad de los accidentes y sus consecuencias.

c) Reducción de la contaminación

Uno de los principales factores de contaminación en las ciudades se genera debido a la congestión vehicular. Por tal motivo, a través de una correcta aplicación del sistema de velocidad variable se logra disminuir los grados de contaminación, mejorando de tal forma la calidad del aire. En adición, se reduce la contaminación sonora y el consumo de combustibles.

d) Reducción del impacto “stop-and-go”

El término “stop-and-go” está referido con el número de maniobras que tiene que realizar el usuario, en relación a continuar con su recorrido dentro de la vía. Como bien este impacto señala las actividades que tiene que realizar el conductor, la de frenar, hacer los respectivos cambios con la caja de velocidades del vehículo, para después poder continuar con su marcha, obstaculiza de manera indirecta el flujo del tránsito, ya que tomando en consideración el tiempo de reacción del vehículo y del conductor es que se puede estimar el tiempo de demora y que llevándolo a un evento constante en el transcurso del tránsito es que se va generando de a pocos congestión vehicular a lo largo de la carretera. Por ello, es que este sistema de velocidad variable permitirá reducir este impacto generando que el tránsito sea uniforme y homogéneo.

2.4.3 Clasificación de límites de velocidad variable

Al emplear el término límite de velocidad variable se refiere a una gran cantidad de sistemas de gestión de velocidad, cada uno con diferentes motivaciones y algoritmos de control. No obstante, todos los sistemas pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

a) Límites de velocidad variable programados

Estos límites dependen de un calendario preestablecido y/u horario, se clasifican en:

- Límites de velocidad variable estacionales:

Se encargan de fijar el límite de velocidad durante una estación en particular, siendo los más comunes los de verano/invierno. Se encuentran principalmente en los países nórdicos, debido a sus condiciones climáticas extremas durante el invierno, generando rutas adversas y dificultando las condiciones de manejo.

- Límites de velocidad variable por hora:

Se aplican principalmente para reducir eventualidades negativas en una vía específica en momentos particulares. Algunos ejemplos de este tipo se encuentran en algunas ciudades alemanas donde las autoridades implementaron el sistema en áreas escolares con el fin de reducir la velocidad al momento donde llegan o salen los niños. Asimismo, en la ciudad de Georgia (EEUU) se reduce la velocidad en la hora de mayor

congestión para asegurar un tránsito constante a lo largo de la vía. Una vez la hora pico ha finalizado, los límites de velocidad vuelven a su normalidad.

b) Límites de velocidad dinámicos

Los límites de velocidad dinámicos pueden ser definidos como un tipo de sistema que produce cambios en los límites de velocidad en respuesta a la información precisa sobre la carretera, conducción, clima y/o condiciones ambientales. En la práctica consiste en señales de mensaje dinámico (DMS) desplegadas a lo largo de una carretera y conectada a través de un sistema de comunicación a un centro de gestión del tráfico, una vez calculado el nuevo límite de velocidad se muestran en los DMS

2.4.4 Velocidad variable en otros países

Además de Europa, el sistema de velocidad variable también es utilizada en diversos lugares de Estados Unidos, como St. Louis, Washington, Nueva Jersey:

a) St. Louis

El Departamento de Transporte de Missouri (MoDOT) utiliza un sistema de velocidad variable a lo largo de la I-270. En esta vía interestatal, los límites de velocidad varían entre 60 mph, cuando el tráfico es muy fluido, y 40 mph, cuando el tráfico es muy denso, es decir, el límite de velocidad se aumenta o se reduce en función de la ocupación de los carriles, el volumen y la velocidad del tráfico. Estos límites pueden ser reducidos si ocurre algún incidente en la vía. Cada vez que se efectúa un cambio, los especialistas de tráfico del MoDOT esperan al menos 5 minutos para volver a ajustar los límites de velocidad (Deyá, 2012, p.9).

b) Washington

El Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT) utiliza un operador que mantiene la coordinación entre la velocidad variable y las señales de mensaje variable en la vía I-90. La información obtenida para la determinación de los límites de velocidad es recogida desde varias fuentes, como por ejemplo la utilización de radares que rastrean velocidades para realimentarlas al sistema de control. Los datos recogidos de la carretera y del sistema de control se procesan en cabinas situadas en el borde de la carretera, las cuales envían dicha información por radio a tres antenas

ubicadas en la cima de una montaña, y de allí se transmite por microondas al centro de control (Deyá, 2012, p.10).

c) Nueva Jersey

En Nueva Jersey Turnpike, una carretera que se encuentra conformada por un aproximado de 120 señales a lo largo de sus 238 km que utiliza espiras inductivas para detectar la información relativa a velocidad y volumen de vehículos. Los límites de velocidad anunciados están basados en la velocidad media de viaje y son mostrados automáticamente, aunque pueden ser corregidos y reducidos en incrementos de 8 km/h hasta una velocidad mínima de 48 km/h debido a la existencia de accidentes, congestiones, obras en la vía, nieve, hielo y niebla. El sistema está controlado 24 horas al día por el Departamento de Operaciones de la Autoridad de Nueva Jersey (Deyá, 2012, p.10).

d) Finlandia

Un sistema de velocidad variable fue construido a lo largo de 8,5 km entre Lohjanharju y la región de Turku. En este sistema, las señales están controladas automáticamente como respuesta a la velocidad recomendada en función de las condiciones climatológicas de la vía.

En un tramo de carretera entre Pyhtää y Kotka se han utilizado límites de velocidad los cuales cambian en función de las condiciones de la vía. El límite de velocidad puede ser de 60, 80 o 100 km/h y es seleccionado automáticamente teniendo en cuenta, también, la información obtenida de las estaciones meteorológicas de la carretera (Deyá, 2012, p.11).

e) Holanda

En 1992 se instaló un sistema de velocidad variable en un tramo de la autopista A2 entre Ámsterdam y Utrecht. Dicho tramo es de 20 km y dispone de señales de límite de velocidad aproximadamente en cada km, además de espiras cada medio km para la recogida de datos y de un detector automático de incidentes. El límite estándar de velocidad es de 120 km/h, y los límites de velocidad variable son de 50, 70 y 90 km/h, los cuales son determinados por un algoritmo de control basado en las medias de velocidad y volumen de tráfico. En caso de que el sistema detecte un accidente, se mostrará en las señales el límite de 50 km/h (Deyá, 2012, p.11).

Para una efectiva aplicación de un sistema de velocidad variable es necesario considerar los siguientes factores:

- El éxito del sistema de velocidad variable se encuentra estrechamente vinculado con el grado en que los conductores cumplan con los paneles de velocidad, motivo por el cual es importante que los organismos se comuniquen con el público e informen de las nuevas medidas mientras sean puestas en marcha.
- Es necesario realizar la implementación en respuesta a una situación real, si los usuarios no se encuentran convencidos del sistema las tasas de cumplimiento serán bajas. Debido a ello, si en caso la razón del nuevo límite de velocidad no es aparente deberá ser explicado de manera apropiada.
- Las señales de los límites de velocidad deben ser visibles para todos los vehículos, en ese caso, las señales deben ser colocadas por encima de soportes de cada carril de tráfico. Los tableros de información deben ser colocados regularmente o de lo contrario se debe dar una información para los menores límites de velocidad o advertir acerca de eventos extraordinarios.

2.5 Simulación del tráfico

La simulación del tráfico es una herramienta fundamental en la ingeniería de tránsito, ya que permite determinar los parámetros de regulación. La simulación del tráfico permite experimentar diferentes estrategias que ayuden como base para experimentar que posible cambio pueda contribuir positivamente en la congestión vehicular, para ello, previamente se debe de analizar la situación del tráfico, estudiar la señalización tanto vertical como horizontal y demás situaciones que puedan generar el congestionamiento de la vía.

La simulación del tráfico constituye un grado de realismo y confiabilidad de los resultados obtenidos en el campo, que dependen fundamentalmente de dos aspectos: la integración de un simulador de red con un simulador de movilidad (Orozco, 2012, p.17). La principal misión de integrar un simulador de red y uno de movilidad, es crear un escenario de la situación actual del tráfico, en el cual se tomen en cuenta las condiciones internas de la interacción de los vehículos bajo un modelo de tráfico real. El simulador de red constituye una herramienta para modelar y evaluar el desempeño de ciertos componentes de los sistemas de comunicación (como estándares, protocolos, algoritmos, configuraciones,

etcétera.), con el fin de realizar pruebas del diseño sin efectuar la implementación real. Por otra parte, la función del simulador de tráfico es generar un modelo de movilidad en un escenario topográfico real, donde se muestran las posibles trayectorias, teniendo en cuenta parámetros como la velocidad de los vehículos, la densidad del tráfico, la topología vial, entre otros (Orozco, 2012, p.17).

Los modelos de movilidad determinan el comportamiento del flujo vehicular, por lo que basado en las características que experimente la vía, los modelos de movilidad se clasificarán en las siguientes categorías.

a) Modelos aleatorios

La movilidad vehicular y los parámetros de la simulación, como la velocidad, la aceleración, los puntos de partida y destino, entre otros, se obtienen de procesos aleatorios. Implementar este tipo de modelo es básicamente mediante el uso de sistemas computacionales que no necesariamente se reflejará la situación real del tráfico vial.

b) Modelos de flujo

Este tipo de modelos de flujos consideran la relación entre los vehículos y su entorno. De acuerdo con la complejidad del modelo, se tendrá una subclasificación:

- **Microscópico:**

Describe el comportamiento y los parámetros de movilidad de cada uno de los vehículos y la interacción entre ellos, como la distancia intervehicular, la velocidad, la aceleración, desaceleración, tiempo de reacción ante un evento, entre otros (Orozco, 2012, p.18).

- **Macroscópico:**

Este modelo no considera las características de cada vehículo en particular y en lugar de ello, describe a nivel general el comportamiento del flujo, la densidad y la velocidad de un “bloque” o conjunto de vehículos (Orozco, 2012, p.18).

- **Mesoscópico:**

Combina las propiedades de los modelos microscópico y macroscópico (Orozco, 2012, p.18). Este modelo permite analizar los eventos que ocurren en la vía para poder calcular los tiempos de entrada y salida de la sección de estudio.

La figura 8 muestra los diferentes niveles de simulación que se puede realizar en el programa Aimsun.

Figura 8: Niveles de simulación. Fuente: Moyano

c) **Ámbito de simulación**

Simular la situación actual de la vía tiene dos propósitos muy importantes, los cuales presentaremos a continuación. Primero, validar los criterios de modelación y los parámetros que se empleó para representar la circulación de la zona de estudio, esto será de suma importancia, ya que se verá reflejado la situación actual de la vía, la cual, en otras palabras, viene a ser la realidad que atraviesa la vía de estudio. En segundo lugar, la simulación permite generar una serie de alternativas a evaluar, por lo que se podrá detectar los posibles problemas existentes de la vía, además de encontrar las posibles soluciones que permitan mejorar el sistema vial.

d) **Periodo de simulación**

Para poder encontrar las posibles soluciones al problema, es de suma importancia simular la situación en los periodos en que la mayoría de los conflictos alcanzan su mayor expresión, es decir las horas en las que el tránsito está a punto de ser caótico y supere el nivel de servicio que puede sostener la vía.

e) **Modelos de tráfico**

Describen el comportamiento de los vehículos en función de la trayectoria y la interacción con los elementos que hacen parte de la misma, como semáforos, intersecciones, señales de parada, cruces, entre otros.

f) Modelos de comportamiento

Son una aproximación a los patrones del movimiento humano, basados en teorías del comportamiento. Los patrones del tráfico se adaptan dinámicamente a las condiciones del escenario, influenciados por patrones sociales y procesos de aprendizaje mediante inteligencia artificial.

g) Simulación es la solución del problema

Por lo general la simulación se utiliza para poder analizar los diferentes beneficios que se puedan obtener con respecto a la problemática de la demanda existente de la vía, para así, ver las posibles soluciones que puedan surgir para mejorar la congestión vehicular.

h) Softwares de simulación en el mercado

Existen muchos softwares dedicados a la simulación del tráfico, de las cuales los más conocidos y usados son Aimsun, SimTraffic y Vissim; sin embargo, estos simuladores presentan algunas limitaciones que es necesario conocer para hacer la mejor selección del software a utilizar.

A continuación, se presenta una lista de softwares de simulación del tráfico clasificados de acuerdo con el modelo en el que se clasifican: microscópico mesoscópico o macroscópico (Deyá, 2012, p.15).

- Aimsun: microsimulador, mesosimulador y macrosimulador desarrollado en España por la empresa TSS (Transport Simulation Systems).
- Contram (CONTinuous TRaffic Assignments Model): macrosimulador desarrollado en el Reino Unido.
- Cube: software que ofrece varios módulos que permiten realizar modelos diversos. Para el modelo microscópico ofrece el módulo Dynasim, para el mesoscópico ofrece el Avenue, y para el macroscópico, el Voyager. El software se desarrolló en Estados Unidos.
- Dracula (Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulAtion): microsimulador desarrollado en el Institute for Transport Studies, University of Leeds en el Reino Unido.

- TransModeler: microsimulador, mesosimulador y macrosimulador desarrollado en Estados Unidos por la empresa Caliper Corporation.
- Vissim: microsimulador desarrollado en Alemania por la empresa PTV AG.

2.6 Estudio de velocidades

La velocidad es uno de los indicadores que determina la calidad de operación en un sistema de transporte, es así que es empleado como un factor más común a considerar en la selección de una ruta específica para trasladarse de un lugar a otro por la minimización de la demora, finalmente se busca una buena velocidad sostenida y segura. Desde el punto de vista del diseño, la velocidad es un parámetro importante que determina los demás elementos del proyecto para el diseño. Es necesario estudiar la velocidad, regularse y controlarse. La definición básica de velocidad es la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo. Siendo tan importante la definición de velocidad, existen definiciones de la misma según como esta sea medida, tales definiciones son la velocidad de punto, velocidad media temporal y la velocidad espacial.

La velocidad es definida como una razón de movimiento en distancia por unidad de tiempo, generalmente con unidades representativas como kilómetros por hora (km/h). El HCM 2010 usa la velocidad promedio de viaje como la medida de velocidad, ya que es fácil de calcular observando cada vehículo dentro del tránsito y es la medida estadística más relevante en relación con otras variables.

2.6.1 Velocidad promedio de viaje

La velocidad promedio de viaje es una medida de tránsito basada en la observación del tiempo de viaje en una longitud dada de carretera. Se calcula como la longitud del segmento dividido entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento, incluyendo todos los tiempos de demoras por paradas. La velocidad promedio de viaje se calcula dividiendo el largo de la carretera, sección o segmento bajo consideración entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento.

- Variables relacionadas con la velocidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la velocidad son la velocidad de punto, la velocidad instantánea, la velocidad media temporal, la velocidad media espacial, la

velocidad de recorrido, la velocidad de marcha, la distancia de recorrido y el tiempo de recorrido.

- Velocidad de punto, es la velocidad de un vehículo en un determinado punto.
- Velocidad instantánea es la velocidad cuando se encuentra circulando en un instante dado.
- Velocidad media temporal, es la media aritmética de las velocidades de punto que pasan en un punto determinado durante un periodo dado.
- Velocidad media espacial, es la media aritmética de las velocidades instantáneas de todos los vehículos que en un instante dado se encuentran en un tramo de vía.
- Velocidad de recorrido, es la relación que tiene la distancia recorrida entre el tiempo total de viaje.
- Velocidad media de recorrido, dada para un grupo de vehículos, es la suma de sus distancias recorridas dividida entre la suma de los tiempos totales de viaje.
- Velocidad de marcha, es la división de la distancia recorrida entre el tiempo durante el cual el vehículo estuvo en movimiento.

2.6.2 Estudio de velocidad de punto

Un estudio de velocidad de punto se encuentra diseñado para poder medir la velocidad en un lugar específico y sus características, considerando las condiciones existentes del tránsito al llevar a cabo el estudio. Por lo general se aplica en los siguientes casos:

- Establecer tendencias de velocidades: empleando la recolección de datos a través de muestreos periódicos en lugares seleccionados. Puede ser específicas por tipo de vehículo.
- Análisis de accidentes: determinación de la relación existente entre la velocidad y los accidentes, que pueda ser utilizada para tomar medidas correctivas.
- Estudios de antes y después: para evaluar el efecto de algún cambio en los controles o condiciones existentes. Para llevar a cabo los estudios de velocidad se cuentan con 3 tipos de métodos: empleando un cronómetro, con radar y empleando detectores neumáticos.

Todos los métodos utilizan los percentiles de velocidad para establecer los límites de velocidad adecuados. Los dos percentiles más importantes son el 50 y el 85. El percentil 50 representa la velocidad media en la cual la mitad de los vehículos observados se

encuentran debajo de dicha velocidad y la otra mitad por encima de la misma, simboliza la velocidad promedio del flujo de tráfico. El percentil 85 es la velocidad a la cual 85% de los vehículos observados están viajando a esa velocidad o por debajo. Igualmente, el percentil 85 es la velocidad asumida a ser la mayor y más segura para una vía.

- Método del cronómetro

El método del cronómetro puede utilizarse para completar con éxito un estudio de velocidad a partir de una muestra tomada en un periodo de tiempo.

- Método del radar

Este método utilizado en general para velocidades de medición directamente en estudios de velocidad. En general el dispositivo puede ser de mano, montado en un vehículo o en un trípode. Para el correcto funcionamiento debe contar con una línea de visión directa para medir con precisión la velocidad y ser operado de manera sencilla. En caso el tráfico existente sea muy complejo es posible emplear más de una unidad si la situación así lo requiere.

- Método de detectores neumáticos.

En este método los tubos neumáticos se colocan en carriles de circulación y se conectan a registradores situados al lado de la carretera.

Figura 9: Método de detectores de neumáticos y registrador. Fuente: Cal y Mayor

La figura 9, muestra los métodos de detectores de neumáticos para calcular las velocidades de circulación de los vehículos que transitan por dicho tramo.

2.6.3 Procedimiento para el análisis de datos en estudios de punto

Luego de realizar la recolección de datos y registrar las velocidades dichas velocidades serán ordenadas de menor a mayor y agrupadas en una distribución de velocidades (Cal y Mayor, 2007, p.253)

Tabla 2: Distribución de velocidades en estudios de punto

Velocidades (km/h)	Número de vehículos observados

Luego de ello se prosigue con la agrupación de los datos en una tabla de frecuencia. Para la agrupación de los datos se determinará el número de intervalos de clase que varían de acuerdo con el tamaño de la muestra, como lo muestra la siguiente tabla (Cal y Mayor, 2007, p.254):

Tabla 3: Números de tamaño de clase por tamaño de muestra.

Tamaño de muestra (n)	Numero de intervalos (N)
50 – 100	7 – 8
100 – 1000	10 – 11
1000 – 10 000	14 - 15

Paso seguido es necesario determinar el ancho que tendrá cada intervalo, para ello es necesaria la siguiente fórmula (Cal y Mayor, 2007, p.254):

$$\text{Ancho del intervalo de clase} = \frac{\text{Amplitud total}}{N} \quad \dots (1.1)$$

Donde la amplitud total es definida como la diferencia algebraica entre la velocidad más alta y la más baja.

Una vez establecidos los intervalos y su amplitud se prosigue con el cálculo de los demás elementos de la tabla, los cuales serán los siguientes:

Punto medio o marca de clase: representa la velocidad media de cada grupo, se obtiene sumando el límite inferior de la clase con el superior y dividiendo entre 2 (Cal y Mayor, 2007, p.254).

$$Punto\ medio = \frac{Limite_{inf} + Limite_{sup}}{2} \quad \dots (1.2)$$

- Frecuencia Observada

Absoluta (f_i): Representa el número de vehículos pertenecientes a cada intervalo (Cal y Mayor, 2007, p.255).

Relativa (%): se obtiene dividiendo la frecuencia observada entre el total de la frecuencia de todos los intervalos y se expresa como porcentaje.

$$\frac{f_i}{n}(100) \quad \dots (1.3)$$

- Frecuencia Acumulada

Absoluta (f_{ia}): Se entiende como la frecuencia total de todos los valores menores que el límite real superior de clase de un intervalo dado, considerándolo inclusive (Cal y Mayor, 2007, p.256).

$$f_{ia} = \sum_{i=1}^n f_i \quad \dots (1.4)$$

Relativa (%): se obtiene dividiendo la frecuencia acumulada absoluta entre el total de la frecuencia de todos los intervalos y se expresa como porcentaje (Cal y Mayor, 2007, p.256).

$$\frac{f_{ia}}{n}(100) \quad \dots (1.5)$$

Además de dichas columnas se considerará lo siguiente:

- a) Una columna del punto medio elevado al cuadrado
- b) Una columna del producto entre el punto medio y la frecuencia observada absoluta.
- c) Una columna del producto entre la frecuencia observada absoluta y el punto medio elevado al cuadrado.

Toda la información mencionada formará la siguiente tabla (Cal y Mayor, 2007, p.255):

Tabla 4: Distribución de frecuencia en velocidad de punto

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Intervalos de clase	Punto medio	Frecuencia observada		Frecuencia acumulada				
		Abs	Relat.	Abs	Relat.	v_i^2	$v_i f_i$	$f_i v_i^2$
(km/h)	v_i (km/h)	f_i	$\frac{f_i}{n}(100)$ (%)	f_{ia}	$\frac{f_{ia}}{n}(100)$ (%)			
Totales Σ	-			-	-	-		

Realizada la tabla de distribución se procede a realizar el histograma de frecuencia, el cual consiste en una serie de rectángulos cuya base son los intervalos de clase sobre un eje horizontal, representados con su punto medio como marca de clase y como altura el porcentaje de la frecuencia observada respectivamente. En conjunto a la tabla de distribución se realizará el polígono de frecuencias, gráfico de línea trazado sobre las marcas de clase y se obtiene uniendo los puntos medios de los techos de los rectángulos del histograma.

A partir de la tabla y los gráficos iniciamos el cálculo de los valores más significativos que describen adecuadamente la distribución de velocidades en el punto de un flujo vehicular y son las siguientes:

a) Velocidad media de punto o velocidad media temporal:

Esta velocidad es una estimación que representa la velocidad esperada de cualquier vehículo elegido al azar, en el punto donde el estudio fue realizado y estadísticamente simboliza la velocidad media real de punto de la población (Cal y Mayor, 2007, p.258).

$$\bar{V}_t = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i v_i)}{n} \quad \dots (1.6)$$

b) Desviación estándar:

La variedad de velocidad de los vehículos genera una dispersión de su velocidad alrededor de la media. La desviación estándar es una medida estadística de dispersión que se expresa de la siguiente manera (Cal y Mayor, 2007, p.260):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [f_i (v_i - \bar{v}_t)^2]}{n-1}} \quad \dots (1.7)$$

c) Error estándar de la media:

Las medias de diferentes muestras de velocidades de punto se distribuyen normalmente alrededor de la media verdadera de la población con una desviación estándar denominada error estándar. Dicho parámetro indica la confianza con la que puede suponerse que la media de la muestra corresponde a la media verdadera de la población o el tránsito que pasa por el punto de estudio. Su valor se determina mediante la siguiente expresión (Cal y Mayor, 2007, p.261):

$$E = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \dots (1.8)$$

En tal sentido para determinar el nivel de confiabilidad la velocidad media verdadera del tránsito se encontrará dentro del intervalo definido por (Cal y Mayor, 2007, p.262):

$$\bar{v}_t \pm KE \quad \dots (1.9)$$

2.6.4 Estudio de velocidad de recorrido

Naturalmente para determinar la velocidad de recorrido es necesario tener los tiempos de recorrido, los que a su vez están asociados con las demoras. Los propósitos del estudio de tiempos de recorrido y demoras son: evaluar la calidad del movimiento vehicular a lo largo de una ruta y determinar la ubicación, tipo y magnitud las demoras del tránsito. La calidad del flujo se mide por las velocidades de recorrido y los tiempos de detección en cada uno de los tramos; los cuales son convertidos posteriormente a medidas de velocidad. Para tal efecto, se acostumbra a utilizar el método del vehículo de prueba o flotante.

La información de las demoras se registra cuando el flujo de tránsito es detenido o forzado. Para un recorrido la duración de las demoras del tránsito se mide en unidades de tiempo, anotando el lugar donde ocurren, causa y frecuencia de estas. Las demoras pueden ser determinadas para recorridos a lo largo de la ruta, durante un día y hora de la semana específicos, así como en lugares seleccionados, donde existan serios problemas de tránsito (Cal y Mayor, 2007, p.264).

La velocidad de recorrido es el resultado de dividir la distancia recorrida, desde el inicio hasta el fin del viaje, entre el tiempo total que se empleó en recorrerla. En el tiempo total recorrido están incluidas todas aquellas demoras operacionales por reducciones de

velocidad y paradas provocadas por la vía, el tránsito y los dispositivos de control, ajenos a la voluntad del conductor.

La velocidad de recorrido sirve principalmente para comparar condiciones de fluidez de ciertas rutas; ya sea una con otra, o bien, en una misma ruta cuando se han realizado cambios, para medir los efectos (Cal y Mayor, 2007, p.247).

2.6.5 Procedimiento para el análisis de datos en estudios de punto

Se procederá a utilizar el método de vehículo de prueba, durante el periodo de máxima demanda de la vía de estudio, donde se tomarán los datos de tiempo de recorrido desde el óvalo Monitor Huáscar hasta la avenida Paseo de la República. Para lo cual, los datos obtenidos se registrarán en una tabla, donde además de registrar el tiempo de recorrido para cada punto de control asignado, se tomará en cuenta también los datos de demoras debido a la de diferentes factores que puedan suscitar en el transcurso de la vía que provoquen demoras.

Tabla 5: Tiempo de recorrido

Lugar Punto de control	Kilometraje (km)	Tiempo (h:min:s)	Causa de la demora

Para poder calcular la velocidad de recorrido será necesario registrar los datos previamente anotados en la tabla de la distancia de recorrido como también el tiempo de recorrido.

$$\text{Tiempo de recorrido} = \text{Tiempo2} - \text{Tiempo 1} \quad \dots (1.10)$$

$$\text{Distancia recorrida} = \text{Distancia2} - \text{Distancia1} \quad \dots (1.11)$$

$$\text{Velocidad de recorrido} = \frac{\text{Distancia recorrida}}{\text{Tiempo de recorrido}} \quad \dots (1.12)$$

2.7 Tecnologías de monitorización

En el ámbito de la movilidad se busca proporcionar herramientas de gestión del tráfico y difusión de información al usuario de forma inteligente, así como para generar nuevas metodologías en la detección de tráfico. Se están investigando diferentes métodos de gestión de tráfico entre los que cabe destacar la planificación de itinerarios, el establecimiento de límite de velocidad variable o la tarificación dinámica. Adicionalmente

se están planteando nuevas formas de detectar y predecir situaciones de congestión y paradas intermitentes en el tráfico.

Las tecnologías de monitorización se pueden dividir en dos grandes grupos, tecnologías intrusivas y no intrusivas: las intrusivas están instaladas en o a lo largo del pavimento, y las no intrusivas se encuentran por encima o a los lados de la carretera causando el mínimo efecto sobre el flujo de tráfico (Sastre, Badillo & Menéndez García, 2010, p.2).

2.7.1 Monitorización intrusiva

Dentro de los sensores intrusivos existen multitud de tipos: el lazo inductivo, el tubo neumático, los sensores piezo-eléctricos, los sensores de fibra óptica y los sensores geomagnéticos.

Los sensores intrusivos son, en general, más económicos y muy útiles para aplicaciones simples, en las que no se necesite excesiva información, sin embargo, presentan una serie de inconvenientes:

- Tanto la instalación como cualquier tipo de reparación exige la realización de obra pesada y el corte del tráfico en la vía.
- Proporcionan información muy limitada; únicamente acerca de los vehículos que pasan por encima del sensor (número de vehículos, velocidad individual).

2.7.2 Monitorización no intrusiva

A diferencia de los intrusivos, este tipo de detectores no interfieren directamente sobre el tráfico durante su funcionamiento, en general proporcionan mayor cantidad de información que los intrusivos y son capaces de monitorizar una zona más amplia de la vía (en particular los sensores láser y las cámaras de vídeo). Como inconveniente cabe destacar que son, en general, más costosos económicamente, tanto los sensores en sí como la instalación de estos. Los detectores no intrusivos empleados en la actualidad son, principalmente de dos tipos:

- Sensores activos, emiten una señal y captan la respuesta reflejada. De este tipo son los radares de microondas, los sensores ultrasónicos y los escáneres láser.
- Sensores pasivos: captan variaciones producidas, en ciertos parámetros, por el paso de un vehículo. Dentro de este tipo se encuentran los sensores infrarrojos, los

sensores acústicos y las cámaras de video (Sastre, Badillo & Menéndez García, 2010, p.4).

3 DESCRIPCION DEL CASO DE ESTUDIO

La vía elegida para el desarrollo de la presente tesis es la vía expresa Javier Prado, entre el óvalo Monitor Huáscar hasta Paseo de la República.

Es considerada una de las avenidas más importantes de la ciudad de Lima al ser transcurrida por un gran número de vehículos diariamente e interconectar gran parte de la capital. En toda su extensión une los distritos de Lince, San Isidro, La Victoria, San Borja, Santiago de Surco y La Molina, cruzando las avenidas Evitamiento, Circunvalación y Paseo de la República.

Asimismo, es la principal vía de acceso y salida del distrito de la Molina, el cual cuenta con gran tránsito por tener colegios, universidades, centros comerciales y bancos, además de conectarlo con el centro financiero de la ciudad de Lima, al cual se trasladan gran parte en vehículos particulares.

Este tramo analizado, consta de un aproximado de seis kilómetros de longitud medidos desde el punto 0 (óvalo Monitor Huáscar), el cual para el desarrollo de este proyecto llamaremos a este punto como la progresiva 0.00 y el punto final ubicado en la avenida paseo de la republica será nombrada como la progresiva 6.00

Figura 10: Tramo de avenida Javier Prado a analizar. Fuente: Propia

La figura 10 muestra el tramo de estudio delimitado entre el óvalo Monitor Huáscar hasta Paseo de la República.

La vía expresa Javier Prado según sus características, como su IMDA, es considerado como una autopista de primera clase, por el hecho que por ella transitan más de 6000

vehículos por día la cual hace referencia en el manual de carreteras “Diseño Geométrico”, además de contar con el mínimo de dos carriles por calzada.

De acuerdo con el manual de carreteras Diseño Geométrico DG-2014, la vía expresa Javier Prado tiene una clasificación por orografía de terreno plano (tipo 1), ya que esta vía presenta pendientes transversales menores o iguales al 10% y sus pendientes longitudinales son por lo general menores al 3%.

En condiciones ideales, de flujo libre, es importante mencionar que la vía puede ser recorrida en 6 minutos, de acuerdo con la información observada en el **Anexo 1**, tiempo que será comparado posteriormente con las simulaciones respectivas.

3.1 Señalización

La señalización planteada para la vía expresa Javier Prado consta de señalizaciones tanto verticales como horizontales. Las señalizaciones horizontales son las que están prácticamente pintadas en la superficie de rodadura y la señalización vertical son las que están colocadas al lado de la vía de tránsito, dichas señalizaciones están ubicadas a lo largo de la vía, la cuales mencionaremos a continuación:

- Informativas

Estas señales están distribuidas alrededor de todo el tramo de la vía expresa Javier Prado dentro del tramo analizado, estas señalizaciones tienen la función de informar al conductor del vehículo de los accesos, salidas alturas máxima de paso, etc. Dentro de estas señales se pudo identificar las que dan información de accesos y salidas de la vía expresa Javier Prado, están las otras que dan información de la dirección a la que se dirige o destino, también están las que informan sobre los peligros que existen metros más adelante en la vía de tránsito.

Figura 11: Señales informativas en la vía. Fuente: Propia

En la figura 11 se muestra las diversas señalizaciones existentes para la vía expresa Javier Prado.

- Resaltos

Los resaltos que presenta la vía expresa Javier Prado son algo escasas ya que, para el tramo analizado, estos reductores aparecen para el sentido Este – Oeste recién a la altura del instituto ADEX en la vía expresa hasta llegar aproximadamente el Banco de la Nación, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12: Resaltos existentes para el control de velocidad. Fuente: Propia

3.2 Ancho de carril

A lo largo de la vía, los carriles presentan un ancho de carril variable, estos valores varían entre los 3.20 y 3.30 metros a lo largo de toda la vía expresa. Si se analiza dichas dimensiones con los nuevos parámetros de diseño de la norma DG-2014, la vía no cumple con lo mínimo especificado por la norma, dado que, para las características que presenta actualmente la vía, se especifica un ancho de carril mínimo de 3.60 metros.

3.3 Número de Carriles

- Sentido Este a Oeste

En el tramo analizado de la vía expresa Javier Prado, se puede observar claramente que por tramos hay una reducción y aumento del número de carriles, por lo que es necesario señalar en que partes del tramo de la vía se presentan estos cambios en el número de carriles.

Empezando desde el óvalo Monitor Huáscar la vía expresa Javier Prado presenta un total de tres carriles con un aumento de un carril por el acceso para los vehículos que se dirigen para La Molina.

Figura 13: Aumento de carril a la altura del óvalo Monitor Huáscar.

Con un aumento casi instantáneo de un carril adicional, haciendo un total de cinco carriles para el tramo de Este a Oeste; sin embargo, uno de estos cinco carriles pasa hacer un carril exclusivo para el transporte público, ya que llegando a la calle la Floresta se encuentra un paradero.

Figura 14: Visualización de los 5 carriles existentes a la altura del Óvalo Monitor Huáscar. Fuente: Propia.

En la figura 14 se muestra la ubicación del primer punto en que se hizo el aforo, este correspondiente a la altura del puente peatonal de la Universidad de Lima.

Figura 15: Reducción de carril debido a pilar del puente peatonal. Fuente: Propia

En la figura 15 algunos cuantos metros más adelante, justo finalizando el paradero mencionado anteriormente, la vía experimenta una reducción repentina de un carril, motivo de esta reducción es por la obstrucción del pilar del puente peatonal.

Después del puente peatonal, pocos metros más adelante la vía experimenta otra reducción en el número de carriles, reduciéndose a un total de tres carriles, por lo que es posible identificar en esta parte de la vía un posible cuello de botella, un motivo por el cual se genera el problema del tráfico. Además, en este tramo de la vía aparece una entrada para los vehículos que transitaban al lado derecho de la vía expresa, manteniéndose la cantidad de tres carriles.

Figura 16: Reducción de carriles de la vía a 3. Fuente: Propia.

El tramo de la vía expresa Javier Prado permanece con tres carriles hasta la casi llegada a la salida para vía Evitamiento, donde la vía pasa de tres carriles a cuatro, este carril

exclusivo para la salida para la vía Evitamiento, además para la entrada para el paradero conocido como el trébol.

Figura 17: Aumento de carriles a 4. Fuente: Propia.

Metros siguientes, la existencia de una rampa entrante proveniente de la vía Evitamiento, además de la salida para buses del paradero, genera un aumento en el número de carriles a cinco, con una disminución de un carril casi inmediato. Siguiendo en el tramo de la vía expresa Javier Prado, aparece la entrada para los vehículos provenientes de la avenida Evitamiento, la cual modifica la vía con el aumento de dos carriles adicionales a la calzada. La cantidad de seis carriles para la calzada se ve disminuida instantes más adelante por la aparición de una vía de salida para vehículos con destino para circunvalación, es en esa parte del tramo donde pasa de seis a cinco carriles, más adelante aparece otra salida con dirección para la panamericana Sur reduciendo una vez más un carril pasando a ser una vía de cuatro carriles.

Figura 18: Ingreso de vehículos a partir de la vía Evitamiento. Fuente: Propia.

Figura 19: Reducción de carriles por salida hacia la Panamericana Sur. Fuente: Propia.

La vía expresa analizada, metros más adelante experimenta otro cambio en el número de carriles pasando a ser solo una vía de tres carriles, el cual se mantiene hasta la llegada paralela al edificio Campo Fe, donde aparece una entrada para la misma vía expresa, generando un cambio de tres a cuatro carriles. Continuando el recorrido por la vía expresa, llegando aproximadamente a la calle Cap. Daniel Muñoz, la vía se reduce en un total de tres carriles para la vía expresa, manteniéndose así hasta la altura de la empresa AGRO COSTA aproximadamente, donde al lado derecho de la vía expresa aparece una rampa de entrada de la auxiliar para el ingreso de la misma aumentando en un carril adicional, que metros más adelante, a la altura de instituto ADEX, vuelve a reducir en número de carriles a tres.

Figura 20: Aumento de carriles por entrada auxiliar de la vía expresa Javier Prado. Fuente: Propia

La vía expresa se mantiene en tres carriles hasta llegar aproximadamente al Banco de la Nación, donde además una rampa de entrada para la vía expresa que deriva de la auxiliar, hace que cambie el número de carriles a cuatro. Los cuatro carriles se mantienen aproximadamente hasta pasar el Museo de la Nación, donde a partir de pasar la rampa de

salida de la vía expresa con destino a la auxiliar, dicho carril desaparece paulatinamente hasta llegar aproximadamente a la rampa que entra para la vía expresa Javier Prado, haciendo que una vez más, la vía cambie de tres a cuatro carriles.

Figura 21: Reducción del número de carriles para la vía expresa Javier Prado. Fuente: Propia

Los cuatro carriles permanecen hasta la rampa que aparece aproximadamente a la altura del edificio del Gimnasio Gold's Gym, donde la vía cambia a tres carriles, la vía se mantienen con la misma cantidad de carriles hasta la altura del grifo Petro Perú, donde aparece una rampa para la vía expresa que proviene de la auxiliar, generando un aumento en el número de carriles, estos cuatro carriles continúan igual hasta llegar a otra rampa de salida de la vía expresa para la auxiliar, el cual está ubicado aproximadamente paralela a la calle Luis Sáenz , donde se reduce en un carril quedando en tres.

Figura 23: Reducción en el número de carriles por rampa para la salida de la vía expresa Javier Prado.
Fuente: Propia.

Figura 22: Aumento en el número de carriles por rampa proveniente de la auxiliar vía expresa Javier Prado.
Fuente: Propia.

Estos tres carriles se mantienen hasta llegar a la oreja donde genera una entrada para la vía expresa analizada, de la avenida José Gálvez Barrenechea, donde cambia la cantidad de carriles de tres a cuatro. Estos cuatro carriles se mantienen igual hasta llegar a la empresa Moviltours, donde este número de carriles empiezan a disgregarse debido a la salida para la auxiliar donde aparecen dos carriles para esta salida que está ubicada aproximadamente llegando al grifo Primax, donde la vía expresa Javier Prado pasa a tres carriles lo cual se mantiene hasta la llegada a Paseo de la República.

Figura 24: Reducción en el número de carriles por división de la vía expresa Javier Prado y auxiliar. Fuente: Propia

- Sentido Oeste a Este

Al igual que el sentido Este a Oeste, se observa reducciones y aumentos del número de carriles, por lo cual se detallará las partes de la vía donde se presentan dichos cambios. Se inicia la descripción desde el cruce de la avenida Javier Prado con la calle Federico Masías, en el distrito de San Isidro. La vía inicia con 4 carriles y luego de 160 metros aproximadamente, llega al cruce con la Calle Las Begonias obteniendo un aumento de carril y una división en la vía. A pesar de contar con en total con 5 carriles, únicamente 3 se encuentran en la vía principal y dos son destinados para la vía auxiliar que recibe los vehículos provenientes de los 3 carriles de la calle Las Begonias. La división principalmente evita el conflicto y alteración del flujo entre la vía principal y la calle Las Begonias.

Figura 25: División de avenida Javier Prado y cruce con la avenida Las Begonias. Fuente: Propia.

Tal estructura se mantiene hasta la salida y entrada que para la vía expresa Paseo de la República en sentido sur a norte, llegando a la altura del colegio San Agustín. Debido a la entrada de vehículos de Paseo de la República, aumenta momentáneamente a seis carriles y luego se mantiene constante en cinco hasta llegar al cruce con la avenida Pablo Carriquiry, donde se genera una auxiliar, reduciendo los carriles principales en cuatro.

A partir de este momento se genera una división clara entre vía principal y las auxiliares que se mantendrá en gran parte del trayecto restante, haciendo posible la interconexión con otras avenidas y auxiliares únicamente a través de entradas y salidas en la vía. La vía se mantiene constante por 230 metros aproximadamente hasta que se genera un carril más únicamente como paradero, al frente de la clínica Ricardo Palma. Metros más adelante la vía regresa a mantener los cuatro carriles previos y se mantiene constante hasta pasar la avenida José Gálvez Barrenechea.

Metros más adelante se realiza una división de un carril, el cual pasa a formar parte de los carriles auxiliares de la vía, dejando la avenida principal con tres carriles y recibiendo algún incremento momentáneo, cuando se presenten ingreso o salidas en la vía. Los 3 carriles se mantienen constantes al cruzar todo el distrito de San Borja, hasta el cruce con la calle Cavallini, donde la vía vuelve a pasar a 4 carriles, aproximándose al paradero Trébol, en el intercambio vial con la avenida Circunvalación. Las siguientes imágenes muestran la cantidad de carriles descrita anteriormente:

Figura 26: Vía expresa Javier Prado con un total de número de carriles de 3. Fuente: Propia.

Al empezar a llegar hacia dicho intercambio la vía vuelve a reducir sus carriles hasta 3 y se mantienen hasta cruzar la avenida Evitamiento, a partir de ese punto la vía vuelve a tener 4 carriles hasta el final de la vía en el óvalo Monitor Huáscar.

Figura 27: Vía expresa Javier Prado con presencia de paradero. Fuente: Propia.

Figura 28: Vía expresa Javier Prado con un total de 4 carriles. Fuente: Propia.

3.4 Límite de velocidad

La vía expresa Javier Prado presenta la señalización correspondiente para los límites de velocidad, para lo cual, estas señales informan a los conductores que, para diferentes tramos de la vía, la velocidad máxima permitida es la que señala en los carteles, estos límites de velocidades oscilan entre 60 km/h y 80 km/h.

3.5 Acceso *Figura 29: Límites de velocidad existentes en la vía. Fuente: Propia.*

La vía expresa Javier Prado presenta a lo largo de su trayectoria varios puntos de accesos, para ello mencionaremos los que están presentes en el tramo analizado para el desarrollo de esta tesis. Entre el óvalo Monitor Huáscar y la avenida Paseo de la República, se encuentra uno de los primeros accesos y salidas de la vía expresa Javier Prado ubicado en la vía Evitamiento.

Figura 30: Accesos y salidas a la altura de la vía Evitamiento. Fuente: Propia.

El segundo punto de accesos y salidas que presenta la vía expresa Javier Prado en la que se encuentra metros más adelante de la vía Evitamiento, la avenida Circunvalación es otro de los puntos ya mencionados.

Figura 31: Accesos y salidas a la altura de la avenida Circunvalación. Fuente: Propia.

Otro punto de acceso y salida identificado en el tramo ya determinado es la de la Av. San Luis; sin embargo, solo para el sentido de Oeste – Este es que se encuentra este punto, ya que para el sentido Este – Oeste está la presencia de rampas.

Figura 32: Accesos y salidas a la altura de la avenida San Luis. Fuente: Propia.

El siguiente punto identificado de accesos y salidas se encuentra ubicado en la avenida Aviación, para la cual, este punto de acceso y salida solo está disponible para los usuarios con sentido de Este – Oeste, en la siguiente imagen se detallará con más exactitud.

Figura 33: Accesos y salidas a la altura de la avenida Aviación. Fuente: Propia.

El otro punto de acceso y salida se encuentra en la avenida José Gálvez Barrenechea, en la siguiente imagen se podrá observar y detallar mejor.

Figura 34: Accesos y salidas a la altura de la avenida José Gálvez Barrenechea. Fuente: Propia.

Por último, encontramos el punto de acceso y salida ubicado en la avenida Paseo de la República, el cual para ambos sentidos presenta lo siguiente:

Figura 35: Accesos y salidas a la altura de la avenida Paseo de la República. Fuente: Propia.

3.6 Posibles puntos críticos

Sentido Este – Oeste

Los puntos críticos que se podrán identificar para la vía expresa Javier Prado, son puntos en los que se genera una acumulación de vehículos, lo cual genera congestión, esto sucede por motivos de reducción en el número de carriles, salidas y entradas de la vía expresa Javier Prado y por la presencia de paraderos, los cuales se detallan líneas adelante.

Los puntos críticos que se pudo identificar, son en donde existen paraderos, salidas y entradas de la vía expresa Javier Prado. El primer punto crítico en el que se observa mayor aglomeración de vehículos es por la existencia del paradero ubicado paralelo a la universidad de Lima, este paradero tiene un carril exclusivo para la parada de los buses; sin embargo, dicho carril desaparece paulatinamente se acerca al puente peatonal, por lo que el conductor tiene que realizar la maniobra de invasión de carril para poder seguir su recorrido

Figura 36: Congestión vehicular a la altura del Jockey Plaza. Fuente: Propia.

Otro punto en el que se genera congestión es en la entrada de la auxiliar de la vía expresa Javier Prado a la altura de la calle Los Tallanes o para mejor referencia, a la altura del Jockey Plaza.

Figura 37: Primer posible punto crítico identificado, ubicado alrededor de la Universidad de Lima.
Fuente: Propia.

Otro punto crítico identificado se ubica metros más adelante del punto anterior, en la que hay una salida con destino para la vía Evitamiento, además de la existencia de paradero de buses relativamente a la misma distancia. Se considera este punto como crítico, ya que se observó que en ese mismo instante la avería de un vehículo, la cual generaba colas en las zonas posteriores, ya que ocupaban el carril exclusivo para el desvío.

Figura 38: Posible punto crítico ubicado a la altura de la vía Evitamiento. Fuente: Propia.

Otro punto crítico identificado se encuentra ubicado en la salida de la vía expresa con dirección para vía Circunvalación, el motivo por el cual, este punto es importante considerar, es principalmente por las maniobras que realizan los conductores en la de invadir carriles, no respetan los carriles exclusivos para los desvíos y los carriles para continuar con el recorrido por la vía expresa Javier Prado. La presencia de un paradero metros más adelante es otro de los motivos por los que se considera un punto crítico.

La existencia de rampas entrantes y salientes de la vía expresa Javier Prado es un factor que influye en la congestión vehicular, por tal motivo también será considerado como un punto crítico.

Figura 39: Posible punto crítico por invasión de carril. Fuente: Propia.

Sentido Oeste – Este

El primer punto identificado se encuentra pasando la avenida José Gálvez Barrenechea, a la altura del Instituto de la Mujer. Tal zona presenta una vía de acceso hacia la avenida Javier Prado y metros más adelante se tiene una salida para los vehículos que deseen tomar la avenida Guardia Civil. Por tal motivo y al no existir la posibilidad de que se genere cuellos de botellas entre los vehículos que se ingresan, los que deseen salir y los que tratan de mantenerse circulando en la vía.

Figura 40: Punto crítico a la altura del Instituto de la Mujer. Fuente: Propia.

Otro punto crítico se encuentra a la altura de la avenida San Luis. Antes de cruzar dicha avenida se observa que existe una señal que indica que se presentará una curva peligrosa más adelante por lo cual los choferes por seguridad bajan su velocidad, a ello se le suma que antes de llegar a la curva existe una entrada hacia la vía expresa para los vehículos que provienen de la avenida San Luis, dificultando el tránsito. Del mismo modo, al finalizar la curva la vía presenta otra entrada para los vehículos, generando congestión y dificultad en la vía.

Figura 41: Punto crítico a la altura de la avenida San Luis. Fuente: Propia.

Figura 42: Punto crítico a la altura de la avenida San Luis. Fuente: Propia.

Otro punto identificado se encuentra al finalizar al cruzar la vía Evitamiento. Al cruzar esa vía se habrá pasado en poca distancia la vía Circunvalación y Evitamiento, ambas cuentan con gran flujo vehicular por lo cual un buen número de vehículos suele ingresar hacia la vía expresa Javier Prado, al aumentar la demanda en tan poca distancia.

Figura 43: Punto crítico a la altura de la avenida Circunvalación y vía Evitamiento. Fuente: Propia.

Finalmente, el último posible punto crítico identificado es a la altura del óvalo Monitor Huáscar. El óvalo posee tres accesos de ingreso de vehículos, ello combinado con ser un óvalo sin semaforización genera un conflicto no solo entre los vehículos de la vía expresa sino también los vehículos provenientes de los demás accesos, reduciendo la velocidad de flujo y generando un cuello de botella.

Figura 44: Punto crítico a la altura del óvalo Monitor Huáscar. Fuente: Propia.

Es importante mencionar que los posibles puntos críticos descritos en el presente capítulo han sido identificados de manera visual durante una visita realizada a la vía, por lo cual serán verificados durante la realización del aforo y la simulación en Aimsun, para ser confirmados o en caso contrario se plantearán los puntos observados luego del análisis más a detalle que podría brindar el software.

4 TRATAMIENTO DE DATOS

4.1 Presentación de base de datos

Para poder desarrollar este proyecto es de suma importancia tener los datos de la densidad vehicular que existe en la vía Expresa Javier Prado, para ello, se realizó el aforo respectivo. De acuerdo con documentación revisada, es recomendable realizar la toma de datos, comúnmente conocido como “aforo” de preferencia durante un día de semana laborable; de tal forma, los resultados obtenidos presentarán valores máximos posibles, los cuales permitirán analizar la vía para la situación más desfavorable posible.

Por ello, para poder realizar este proyecto, se ha partido con la toma de datos de densidad vehicular de la vía expresa Javier Prado, dicha toma de datos se realizó en dos días separados. Ambos fueron realizados un jueves, el primero entre las 7:30 a 9:30 am y el segundo de 6:30 a 8:30 pm. El aforo se ha dividido en periodos de 15 minutos cada uno para llevar un mejor control de las unidades contadas, además de representar estos en gráficas, en la que se pueda observar con mayor claridad los cambios que pueda haber durante los 15 minutos subsiguientes.

Dado que la vía cuenta con una longitud total de 5.8 km y presenta características variables en todo su recorrido, como son el número de carriles, entradas, salidas a la vía, velocidad máxima permitida, etc. se decidió dividir la vía en 4 puntos de aforo. Considerando lo anteriormente mencionado y tratando de mantener una longitud lo más similar posible entre los 3 tramos.

Los puntos elegidos para el aforo de vehículos se determinaron desde el sentido Oeste a Este y son los descritos y se pueden observar en la figura 44:

- Punto 1: Altura de la Universidad de Lima: Corresponde al puente peatonal ubicado al frente de la Universidad de Lima.
- Punto 2: Altura Trébol Javier Prado: Corresponde al puente peatonal ubicado a la altura de la avenida Circunvalación.
- Punto 3: Altura avenida Aviación: Corresponde al puente peatonal ubicado al frente del centro comercial La Rambla San Borja.
- Punto 4: Altura vía Expresa Paseo de la República: Al frente del supermercado Sodimac.

Figura 45: Puntos de aforo elegidos para la investigación. Fuente: Propia.

4.1.1 Primer aforo

El primer aforo fue realizado el jueves de 6:30 a 8:30 pm y se obtuvieron los siguientes valores.

- **Sentido Oeste a Este**

Tabla 6: Aforo sentido Oeste a Este.

PUNTO N° 1 DE AFORO			PUNTO N° 2 DE AFORO		
HORA	SENTIDO O - E	N° VEHÍCULOS	HORA	SENTIDO O - E	N° VEHÍCULOS
18:30	18:45	585	18:30	18:45	645
18:45	19:00	573	18:45	19:00	623
19:00	19:15	543	19:00	19:15	627
19:15	19:30	549	19:15	19:30	614
19:30	19:45	534	19:30	19:45	608
19:45	20:00	562	19:45	20:00	582
20:00	20:15	635	20:00	20:15	617
20:15	20:30	602	20:15	20:30	602

PUNTO N° 3 DE AFORO			PUNTO N° 4 DE AFORO		
HORA	SENTIDO O - E	N° VEHÍCULOS	HORA	SENTIDO O - E	N° VEHÍCULOS
18:30	18:45	626	18:30	18:45	708
18:45	19:00	642	18:45	19:00	678
19:00	19:15	602	19:00	19:15	645
19:15	19:30	593	19:15	19:30	629
19:30	19:45	572	19:30	19:45	612
19:45	20:00	565	19:45	20:00	616
20:00	20:15	632	20:00	20:15	637
20:15	20:30	608	20:15	20:30	621

Se puede observar en las gráficas, que durante las horas en que se hizo el aforo, se mantiene casi la misma distribución de vehículos contabilizados cada 15 minutos; sin embargo, acercándose a las 8:30 pm, se observa que la densidad vehicular va decreciendo paulatinamente, esto debido al fin de la hora pico, en la que la congestión vehicular fue considerable. Las siguientes tablas muestran los flujos obtenidos para el sentido Oeste a Este:

Figura 46: Representación gráfica de vehículos contabilizados, sentido Oeste a Este. Fuente: Propia.

- **Sentido Este a Oeste**

Los siguientes datos son los obtenidos para el sentido Este a Oeste:

Tabla 7: Aforo sentido Este a Oeste

PUNTO N° 1 DE AFORO		
HORA	SENTIDO E - O	N° VEHÍCULOS
18:30	18:45	753
18:45	19:00	744
19:00	19:15	724
19:15	19:30	711
19:30	19:45	708
19:45	20:00	726
20:00	20:15	723
20:15	20:30	737

PUNTO N° 2 DE AFORO		
HORA	SENTIDO E - O	N° VEHÍCULOS
18:30	18:45	714
18:45	19:00	719
19:00	19:15	702
19:15	19:30	706
19:30	19:45	683
19:45	20:00	695
20:00	20:15	726
20:15	20:30	751

PUNTO N° 3 DE AFORO		
HORA	SENTIDO E - O	N° VEHÍCULOS
18:30	18:45	711
18:45	19:00	713
19:00	19:15	702
19:15	19:30	691
19:30	19:45	693
19:45	20:00	716
20:00	20:15	735
20:15	20:30	738

PUNTO N° 4 DE AFORO		
HORA	SENTIDO E - O	N° VEHÍCULOS
18:30	18:45	652
18:45	19:00	624
19:00	19:15	629
19:15	19:30	630
19:30	19:45	612
19:45	20:00	607
20:00	20:15	617
20:15	20:30	638

En cada gráfica se podrá observar los cambios de la densidad vehicular de acuerdo con cada punto de aforo y también con respecto al sentido. Al igual que el sentido anterior se tiene las ilustraciones para ayudar a comprender el comportamiento vehicular durante el aforo realizado:

Figura 47: Representación gráfica de vehículos contabilizados, sentido Este a Oeste. Fuente: Propia.

Interpretando la gráfica del primer punto de aforo, se puede observar que a las 7:15 pm la cantidad de vehículos que transitan descende por lo que, a esa hora se contabiliza la menor cantidad de vehículos, puesto que para ese instante el tránsito está congestionado, por lo que las velocidades con la que transitan los vehículos son muy bajas o simplemente están detenidos. Aproximadamente a las 8:15 pm se observa un cambio, el cual es que la cantidad de vehículos que pasan por ese punto de aforo aumenta, por lo que el tránsito es más fluido y homogéneo.

En general se puede interpretar, que a las horas en las que la gráfica llega al pico más bajo, el tránsito vehicular es lento; esto se puede observar que, en la parte central de las gráficas, demuestra que el tránsito vehicular es más lento e interrumpida, por lo que los vehículos se transportan muy lento. Esto también significa la mayor presencia de vehículos que transitan en cada lapso demostrado en el aforo.

4.2 Aforo de Velocidades

Adicional al aforo descrito líneas arriba, se realiza un aforo de velocidad para conocer la velocidad en que transitan los vehículos durante hora punta. El aforo fue: realizado un viernes, de 7:00 a 7:30 pm en el puente peatonal ubicado al frente del Centro Comercial La Rambla San Borja, ubicación elegida porque se encuentra en una zona de bastante movimiento dentro de la vía expresa Javier Prado. Los resultados obtenidos muestran velocidades bastante bajas para la categoría a la que vía pertenece, siendo completamente parecidos a los descritos por Santa María y otros (2014) y haciendo evidente la necesidad de soluciones para mejorar los niveles de servicio de la vía. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Figura 48: Aforo de Velocidades Sentido Este – Oeste. Fuente: Propia.

Figura 49: Aforo de Velocidades Sentido Oeste – Este. Fuente: Propia.

5 CONSTRUCCIÓN DE RED VIAL EN AIMSUN

En el presente proyecto se ha utilizado el software Aimsun, el cual ofrece una gran variedad de aplicaciones a partir de las cuales se puede analizar una vía, como el análisis de nuevas infraestructuras, control de tráfico gestión del tráfico, etc.

A continuación, se explican los pasos seguidos para la simulación del tráfico.

5.1 Presentación del plano a introducir en software

Para el adecuado desarrollo de la simulación de tráfico, es requerido que la infraestructura a usar en el programa sea lo más parecida posible a la red viaria existente. El programa permite importar redes de dos maneras: desde Open Street Maps o a través de AutoCad o Gis. En el presente proyecto se decidió emplear Open Street Maps por la facilidad de importación y creación de la vía que genera el software. El **Anexo 2** muestra el plano a exportar al software para la creación de la vía. Dicho plano es importado y con ello se obtiene el diseño de la vía y zonas aledañas en el software de simulación. Dicho plano servirá como modelo para poder realizar el diseño de la vía en el programa.

5.2 Introducción de parámetros geométricos de la vía

Para la construcción de la vía en el programa simulador Aimsun, es de suma importancia la introducción de parámetros como velocidad, número de carriles, anchos de carril, tipo de vía, por lo que será necesario tener dichos datos para empezar con la construcción de la vía de estudio.

El programa Aimsun permite el ingreso de los parámetros de manera sencilla y fácil de identificar en que secciones se debe ingresar los parámetros correspondientes.

A continuación, se presenta cómo se ingresaron dichos datos en el software Aimsun:

- Velocidad y tipo de vía

En la figura 50 se puede observar que, en el cuadro de diálogo presentado, se puede modificar la velocidad de acuerdo con la toma de datos que se realizó, además también, se puede cambiar el tipo de vía de acuerdo con la clasificación de la vía.

Sección: 1396 (Capa: Network) {eae5ac3-c616-41fc-ae43-8facc2e8ef59}

Principal | Pendiente | Carriles | Modelos Dinámicos | Modelo Estático | Uso | Atributos

Nombre: ID Externo:

Tipo de Vía: 184: Primary (primary) Velocidad Máxima: 80.00 km/h

Coste Definido por el Usuario: 0.00 Segundo Coste Definido por el Usuario: 0.00

Tercer Coste Definido por el Usuario: 0.00 Capacidad: 2700.00 PCUs/h

Tipos de Vehículos No Permitidos

☒ Usar los Tipos de Vehículos No Permitidos del Tipo de Vía

- ☐ 447: Bicycle
- ☐ 58: Bus
- ☐ 53: Car
- ☐ 60: Pedestrian
- ☐ 62: Taxi
- ☐ 56: Truck

Información

Clase Funcional: 3

Longitud: 134.097 m

Ayuda OK Cancel

Figura 50: Ingreso de tipo de vía y límite de velocidad. Fuente: Propia.

- Número y ancho de carril

En la figura 51, se presenta el número de carriles, el cual puede ser modificado con respecto a la cantidad de carriles que presenta la vía expresa Javier Prado, además de, establecer los anchos de carril.

Sección: 831 (Capa: Network) {22be7c76-fd3e-439c-a993-d03af3fc619e}

Principal | Pendiente | Carriles | Modelos Dinámicos | Uso | Atributos

Ancho de Carril: 3.30 m Distancia de Visibilidad de los Carriles Reservados: 200.0 m Distancia a Línea de Parada: Por Defecto

Tipos de Carril | Líneas de Parada | Velocidades Detalladas | Líneas Continuas | Decoración

Carril	Tipo de Carril	Ancho
1		3.30 m
2		3.30 m
3		3.30 m
4		3.30 m
5		3.30 m

Opciones de Tipo de Carril (sólo para Carriles Reservados con Más de un Segmento)

☐ Reservar el Primer Segmento del Carril ☐ Reservar el Último Segmento del Carril

Ayuda OK Cancel

Figura 51: Ingreso de ancho de carril. Fuente: Propia.

5.3 Introducción de elementos geométricos de la vía

Para empezar con la simulación, además de graficar la vía y cambiar los parámetros como la velocidad, los anchos de carril, número de carriles, etc., es necesario analizar en conjunto a los vehículos, la agresividad y la imprudencia para el cambio de carril. Para ello se presentará a continuación como se procede a cambiar dichos parámetros.

- **Tipo de vehículo (vehículos livianos)**

	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Aceleración Máxima	2.50 m/s ²	0.20 m/s ²	2.00 m/s ²	3.00 m/s ²
Desaceleración Normal	3.50 m/s ²	0.25 m/s ²	3.50 m/s ²	4.50 m/s ²
Desaceleración Máxima	5.50 m/s ²	0.50 m/s ²	5.00 m/s ²	7.00 m/s ²
Agresividad en el Tiempo entre Vehículos	0.00	0.00	-1.00	1.00

	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Factor de Sensibilidad	1.00	0.00	1.00	1.00
Hueco	0.00 segs	0.00 segs	0.00 segs	0.00 segs

☐ Favorece Aparición de Atascos

Modelo de Cambio de Carril

☐ Permanencia en el Carril de Adelantamiento ☒ Cambio de Carril Imprudente

Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos

	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Margen para la Maniobra de Adelantamiento	5.00 segs	3.00 segs	1.00 segs	10.00 segs

Figura 52: Características del vehículo para la simulación. Fuente: Propia.

El programa establece dichos valores de acuerdo con el tipo de vehículos que se utilizará para la simulación.

- **Dimensiones del vehículo**

Esta opción permite modificar las medidas de los vehículos, por lo que la dimensión se coloca entre un intervalo como se muestra anteriormente.

Figura 53: Características del vehículo para la simulación. Fuente: Propia.

- Comportamiento de cambio de carril

Este cuadro de diálogo del programa permite asignar valores para el comportamiento de cambio de carril.

Figura 54: Comportamiento cambio de carril. Fuente: Propia.

5.4 Parámetros del tráfico

Finalizada la red vial es necesario definir las características que presenta la vía expresa Javier Prado. En primer lugar, se define la jerarquía de cada vía de acuerdo con su tipo, en la vía expresa se han identificado dos tipos de vías: autopista y las rampas de entrada o salida. En segundo lugar, se ingresan el número de carriles; cabe mencionar que en el caso de estudio existen tramos de 3, 4 y hasta 5 carriles como ya se ha descrito anteriormente.

Finalmente, se ingresan los límites de velocidad para todo el largo de la vía, en este caso los límites de velocidad son 60 y 80 km/h; con ello se da por finalizado la red vial.

Para realizar la simulación es necesario seguir los siguientes pasos:

a) Creación de estados de tráfico:

La metodología de estados de tráfico es comúnmente utilizada cuando se ha realizado aforos vehiculares y se utiliza para las condiciones más desfavorables de circulación, considerando que si se logra solucionar la congestión en la hora de máxima demanda funcionará también para las horas valle.

b) Creación de demanda de tráfico:

Una vez creado el estado de tráfico es necesario relacionarlo con una demanda de tráfico. Para el presente caso se han establecido dos demandas, una para la hora de máximo movimiento (100% de flujo máximo) y otro para las horas valle (50% de flujo máximo). Adicionalmente, es necesario establecer la hora de inicio, la duración y el factor de movimiento a analizar.

c) Creación de escenario dinámico o modelación propiamente dicha:

Una vez ingresada toda la información se procede a crear el escenario a evaluar y utilizada toda la información ingresada: entradas, salidas, asignación del tráfico, etc. Finalmente, se inician las replicaciones para simular el comportamiento de la vía y obtener los primeros resultados.

6 SIMULACIÓN SIN VELOCIDAD VARIABLE

La simulación sin velocidad variable viene a ser en otras palabras, la simulación de la situación actual de la vía de estudio, por lo que se puede representar gráficamente, cual es el comportamiento de la vía expresa Javier Prado a lo largo del tramo de estudio.

Para realizar esta simulación, se tomaron en cuenta las variables como velocidad, ancho de carril, número de carriles, etc., para así obtener valores representativos y muy cercanos a la realidad.

A continuación, se presenta la construcción de la vía en el programa Aimsun, donde se podrá observar el comportamiento de la vía con los flujos vehiculares realizados durante la hora aforada.

Figura 55: Simulación de la vía expresa Javier Prado en el programa Aimsun. Fuente: Propia.

La figura 55 representa parte de la vía expresa Javier Prado, en la cual se puede observar el flujo existente de la vía. Para ello el comportamiento que se pudo observar en la realidad cuando se realizaron los aforos, se pudo observar que el tránsito era lento e interrumpido, por lo que generaba que los vehículos se estancaran, haciendo que los tiempos de viaje sean mayores con respecto a un tránsito homogéneo y fluido. Se pudo comprobar que se generan cuellos de botella, en las zonas en donde existen accesos y salidas de vehículos.

Adicionalmente, al generarse el cuello de botella, los conductores al momento de acercarse a su salida buscan la manera más rápida de salir, decidiendo cruzar desde el segundo o tercer carril y generando mayor congestión de la que debería existir en la vía.

Después de haber hecho la simulación respectiva, el programa realiza los cálculos correspondientes, para así, arrojar los resultados de la simulación, los cuales se presentan a continuación:

6.1 Variables locales

Es necesario realizar un análisis más a detalle del comportamiento del tramo de la vía de estudio. Para ello, se obtiene del programa Aimsun, los valores de las variables nombradas anteriormente, para lo cual, se tomará el punto 3, en el que se pueda observar mayor incidencia de tráfico, menor velocidad, etc., a continuación se muestran dichos resultados.

Densidad

Figura 56: Gráfica de densidad para el tramo 3. Fuente: Propia.

La figura 56 muestra la representación gráfica de la densidad a lo largo de la vía expresa Javier Prado (Punto 3). Se observa una densidad constante desde las 7:30 pm hasta las 8:30 pm.

Flujo

La figura 57 muestra la gráfica del flujo vehicular de la vía expresa Javier Prado a lo largo del tramo 3 de la vía de estudio.

Figura 57: Gráfica de flujo para el tramo 3. Fuente: Propia.

Velocidad

La figura 58 muestra la velocidad alcanzada en el tramo 3 de la vía, se observa que la velocidad a la que trascurren los vehículos es menor a 5 km/h. En general, el tramo 3 presenta unas condiciones totalmente congestionadas, las cuales se presentan de la misma manera en el resto de la vía.

Figura 58: Gráfica Velocidad. Fuente: Propia.

6.2 Variables globales

Se muestran los resultados de las variables obtenidos en la simulación con la configuración actual de la vía de estudio, el cual corresponde a la hora en la que se realizó también el aforo.

Tabla 8: Resultados globales de simulación sin velocidad variable.

Serie Temporal	Valor	Desviación Estándar	Unidades
Densidad – Car	49.86	ND	veh/km
Flujo – Car	7584.00	ND	veh/h
Tiempo de Viaje – Car	552.45	501.92	seg/km
Velocidad – Car	9.42	4.39	km/h

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de la simulación. Además, a continuación, se muestra la gráfica correspondiente a la densidad de la tabla anterior.

Densidad

Figura 59: Gráfica Densidad (veh/km). Fuente: Propia.

La figura 59 representa el crecimiento de la densidad de acuerdo con el aumento de los vehículos a lo largo de la vía y del tiempo en el que se realizó el aforo. La densidad al superar los 42 km/h, de acuerdo con el HCM 2010 se considera una vía congestionada.

Es necesario resaltar de la tabla anterior la velocidad y el tiempo de viaje. La velocidad como se observa es de 9 km/h aproximadamente, totalmente por debajo del límite máximo permitido de 60 km/h que se tiene en la vía. Del mismo modo, el tiempo de viaje es de 552 seg/km, haciendo un total de 54 minutos para poder transcurrir la vía. Comparándolo con el tiempo 6 minutos que nos toma transcurrir la vía en condiciones de libre tránsito es posible comentar que la vía se encuentra trabajando sobre su capacidad durante la hora de mayor congestión vehicular.

6.3 Simulación de caso con flujo elevado

Adicionalmente, se incrementa el flujo recolectado en el horario de la mañana para posteriormente volver a simular la vía tanto en la situación actual como aplicando el sistema de velocidad variable. Dicha medida se realizó principalmente para poder analizar el comportamiento que presentaría la vía y el sistema de velocidad variable frente a un estado más crítico al actual, el cual podría suceder en unos años gracias al crecimiento del parque automotor existente en la ciudad.

Para obtener el nuevo flujo se realizó una proyección de tránsito futuro para un periodo de 5 años. Dicho flujo se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$TF = TA + IT \quad \dots (5.1)$$

Dónde:

TF: Tránsito Futuro

TA: Tránsito Actual

IT: Incremento del tránsito

En adición, el tránsito actual (TA) y el incremento del tráfico (IT) dependen de las siguientes fórmulas y parámetros.

$$TA = TE + Tat \quad \dots (5.2)$$

$$IT = CNT + TG + TD \quad \dots (5.3)$$

Dónde:

TE: Tránsito existente

Tat: Tránsito atraído

CNT: Crecimiento normal del tránsito

TG: Tránsito Generado

TD: Tránsito Desarrollado

A partir de las ecuaciones (5.2) y (5.3) la ecuación (5.1) es expresada de la siguiente manera:

$$TF = (TE + Tat) + (CNT + TG + TD) \quad \dots (5.4)$$

Para la estimación del presente tránsito futuro, únicamente se está considerando el tránsito existente (TE) y el crecimiento normal del tránsito (CNT). El tránsito atraído, el generado y el desarrollado han sido desestimados al tratarse de una vía ya existente que no será modificada y que se encuentra totalmente consolidada, al igual que las zonas aledañas por donde pasa.

6.3.1 Tránsito Existente (TE):

Obtenido a través del aforo vehicular, se han considerado dos tipos unos para cada sentido (este y oeste).

6.4 Crecimiento Normal del Tránsito (CNT)

Para calcular el CNT se ha procedido a obtener las tasas de crecimiento poblacional y vehicular, las cuales se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 9: Tabla de crecimiento poblacional de la ciudad de Lima

Año	Población	Variación
2000	6,968,339	
2001	7,103,087	1.93%
2002	7,236,194	1.87%
2003	7,367,376	1.81%
2004	7,496,342	1.75%
2005	7,622,792	1.69%
2006	7,744,537	1.60%
2007	7,861,745	1.51%
2008	7,977,709	1.48%
2009	8,095,747	1.48%
2010	8,219,116	1.52%
2011	8,348,403	1.57%
2012	8,481,415	1.59%
2013	8,617,314	1.60%
2014	8,751,741	1.56%
2015	8,890,792	1.59%

Tabla 10: Tabla de crecimiento vehicular.

Mes	2015	2016	Variación
Enero	15,255	12,718	-16.63%
Febrero	13,384	11,981	-10.48%
Marzo	14,274	13,466	-5.66%
Abril	13,594	13,704	0.81%
Mayo	13,064	12,904	-1.23%
Junio	13,407	12,354	-7.85%
Julio	11,719	11,137	-4.97%
Agosto	13,695	12,495	-8.76%
Setiembre	12,561	13,485	7.36%
Octubre	11,454	12,906	12.68%
Noviembre	12,212	13,012	6.55%
Diciembre	12,927	13,714	6.09%
Total	157,546	153,876	-2.33%

Como se puede observar, la variación de crecimiento vehicular ha sido negativa entre el 2015 y 2016, probablemente debido al desaceleramiento económico sufrido en los últimos años. Ante ello, se ha optado por elegir la tasa poblacional para poder calcular el flujo futuro; a través de la siguiente ecuación se puede calcular la población futura.

$$P_{i+n} = P_i(1 + Tc)^n$$

Dónde:

Pi: Población Actual

Tc: Tasa de Crecimiento

n: Número de Años

Con ello se procedió a calcular la población futura y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11: Cálculo de población al año 2022

Variables	Valores	Und
Pi	8,890,792	Hab
TC	1.589%	
n	5	Años
P _{i+n}	9,619,896.89	
Variación	8%	

Como se observa en la tabla, se tiene un crecimiento de 8% en la población. Sobre ese 8% se hará el cálculo de la cantidad de vehículos adicionales que se tendría en la ciudad, de acuerdo con las proyecciones económicas se espera un crecimiento a razón del 4%, cifra con la que se procedió a calcular la cantidad de vehículos que transitan por la vía para posteriormente realizar la simulación con demanda futura.

Se presenta a continuación la simulación con la variante de un aumento en el flujo vehicular bajo condiciones de crecimiento exponencial. Para ello se tendrá unos nuevos resultados de las variables de la siguiente tabla.

Tabla 12: Resultados de simulación con flujo elevado

Serie Temporal	Valor	Desviación Estándar	Unidades
Densidad - Car	45.1	ND	veh/km
Flujo - Car	9805	ND	veh/h
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Car	445.02	1020.99	sec
Tiempo de Viaje - Car	256.8	368.78	seg/km
Velocidad - Car	21.87	9.68	km/h

Densidad

Figura 60: Gráfica Densidad. Fuente: Propia.

Representación gráfica de la densidad presente en la vía de estudio para el caso con un flujo adicional.

Flujo

Representación gráfica del flujo presente en la vía expresa Javier Prado con el aumento de flujo adicional.

Figura 61: Gráfica Flujo. Fuente: Propia.

Velocidad

Representación gráfica del desarrollo de velocidades a lo largo de la vía expresa Javier Prado. Los resultados obtenidos son analizados en el capítulo análisis de los resultados.

De acuerdo con los resultados observados, en la hora punta de la mañana, inclusive con la proyección del crecimiento vehicular no se tiene un caso tan desfavorable como el existente en la noche, lo cual lleva a enfocarse en ese caso para las futuras simulaciones.

Figura 62: Gráfica velocidad. Fuente: Propia.

7 SIMULACIÓN CON VELOCIDAD VARIABLE

La simulación con velocidad variable viene a ser una simulación en la cual la velocidad máxima permitida es disminuida o aumentada de acuerdo con las condiciones en la que se encuentra la vía tales como flujo, densidad, hora, condiciones climáticas, problemas en la vía como accidentes, etc., por lo que esta simulación tiende a ser un procedimiento heurístico. Este procedimiento consiste en variar la velocidad de las secciones de manera manual y comprobar si el resultado obtenido es favorable o no.

Después de realizar estos cambios manuales de velocidad en el programa Aimsun, se presentó los resultados obtenidos de las simulaciones, para lo cual se busca que las velocidades propuestas sean las ideales para mejorar la congestión vehicular, con el motivo de reducir los tiempos de espera en cola y no se genere el efecto de colas vehiculares, con ello se busca que los resultados que se obtienen sean las más favorables para el proyecto. Adicionalmente, en la presente simulación el factor de agresividad y cambio de carril no se ha considerado, dado que para el éxito del sistema es necesario un ordenamiento general de la vía.

Cabe resaltar, que la velocidad no puede ser menor al 50 % de la máxima velocidad permitida, por lo cual en algunos casos las velocidades mínimas consideradas fueron 30 y 40 km/h donde correspondan. Las velocidades consideradas durante la simulación más favorable fueron las siguientes:

Sentido Este – Oeste

Se cambió la velocidad a 50 km/h desde el óvalo Monitor Huáscar hasta el inicio de la avenida Evitamiento, luego se modificó a 40 km/h la velocidad desde Evitamiento hasta la avenida Aviación, donde se observó una congestión importante, luego se modificó a 30 km/h hasta pasando Gálvez Barrenechea y finalmente se terminó la vía con 45 km/h.

Sentido Oeste - Este:

Se inicia con velocidades de 50 km/h, luego se va disminuyendo a 40 km/h y posteriormente a 30 km/h para poder transcurrir el cambio de 5 a 4 carriles y posteriormente a 3 carriles. Luego se aumenta la velocidad hasta los 50 km/h para toda la zona de Aviación, transcurrida esa zona se empieza a disminuir hasta llegar a 30 km/h para poder pasar el cambio de carriles n°2 antes de llegar al trébol, igualmente se vuelve a

aumentar la velocidad hasta llegar a la altura del Jockey, donde se procede a disminuir hasta llegar a los 30 km/h y poder finalizar la vía.

Adicionalmente, las vías de acceso y salidas entraran con una diferencia de 5 km/h en ambos sentidos para poder acoplarse rápidamente a la vía cuando sea posible. La tabla 18 muestra los resultados obtenidos de la simulación más favorable obtenida, los cuales serán comparados con los de la simulación anterior más adelante.

Tabla 13: Resultados de simulación con velocidad variable.

Serie Temporal	Valor	Desviación Estándar	Unidades
Densidad – Car	45.21	ND	veh/km
Flujo – Car	8,605	ND	veh/h
Tiempo de Viaje - Car	380.36	ND	seg/km
Velocidad - Car	26.5	ND	km/h

Se puede observar que, con el sistema de velocidad variable, los resultados que se obtiene de la simulación son favorables con respecto a los resultados obtenidos de la simulación sin velocidad variable.

Se puede observar un aumento en la velocidad a 26 km/h para la vía de estudio entre las horas 7:30 – 9:30 de la noche. Adicionalmente, durante la simulación, la vía presentó el mayor tránsito de vehículos, sin embargo, a pesar de que se formó una cola por la cantidad de vehículos, se observó un tránsito homogéneo, favorecido gracias al orden existente en todo el largo de la vía.

8 RESULTADOS Y ANÁLISIS POR TRAMOS

Se procedió a realizar el análisis de los resultados por tramos de la vía de estudio, la cual estará dividida en 4 tramos de la siguiente manera. Existirán 2 tramos por cada sentido, para el sentido de Este – Oeste y viceversa, dichos tramos tendrán aproximadamente la misma distancia por lo que el punto central que dividirá la vía será la avenida San Luis.

Figura 63: División por tramos de la vía de estudio. Fuente: Propia.

8.1 Primer Tramo

El primer tramo está comprendido entre el óvalo Monitor Huáscar y la avenida San Luis, en el sentido Este a Oeste. A continuación, se presenta las gráficas de densidad y flujo:

Densidad

Figura 64: Gráfica densidad. Fuente: Propia.

Se observa que en la gráfica que a partir desde las 19:20 se llega a la densidad más alta posible, manteniéndose a lo largo del resto de la simulación. Representación gráfica de densidad para un primer tramo de la vía de estudio la vía expresa Javier Prado.

Flujo

Figura 65: Gráfica Flujo. Fuente: Propia.

Representación gráfica de flujo para el primer tramo de la vía en el sentido de Este -Oeste.

Al generarse el cuello de botella desde las 19:20 horas no es posible incrementar el flujo de vehículos que circulan por la vía, generando un bajo ingreso de vehículos a lo largo de la simulación.

8.2 Segundo Tramo

El segundo tramo está comprendido entre la avenida San Luis y la vía Expresa Paseo de la República, en el sentido Este a Oeste. A continuación, se presenta las gráficas de densidad y flujo:

Densidad

Figura 66: Gráfica densidad. Fuente: Propia.

Representación gráfica de la densidad para el segundo tramo para el sentido de Este – Oeste.

Flujo

Figura 67: Gráfica flujo. Fuente: Propia.

Representación gráfica del flujo para el segundo tramo de la vía en el sentido de Este – Oeste. A diferencia del sentido anterior, se observa una densidad que variando, generando que el flujo se comporte de la manera.

8.3 Tercer tramo

El tercer tramo está comprendido entre la vía Expresa Paseo de la República y la avenida San Luis, en el sentido Oeste a Este. A continuación, se presenta las gráficas de densidad y flujo:

Densidad

Figura 68: Gráfica densidad. Fuente: Propia.

Representación gráfica de los resultados de densidad para el tramo 3 de la vía de estudio.

Flujo

Figura 69: Gráfica flujo. Fuente: Propia.

Representación gráfica del flujo existente del tramo 3 de la vía expresa Javier Prado.

8.4 Cuarto tramo

El cuarto tramo está comprendido entre la avenida San Luis y el óvalo Monitor Huáscar, en el sentido Oeste a Este. A continuación, se presenta las gráficas de densidad y flujo:

Densidad

Figura 70: Gráfica densidad. Fuente: Propia.

Densidad obtenida para el cuarto tramo, el cual varía al pasar el tiempo.

Flujo

Figura 71: Gráfica flujo. Fuente: Propia.

Representación gráfica del flujo para el cuarto tramo de la vía de estudio Javier Prado.

Comparando los resultados de ambas simulaciones, se observa que la densidad se ha mantenido prácticamente sin variación en la vía, sin embargo, las otras dos variables fundamentales han mejorado considerablemente. El flujo aumentó un 14% comparado a la situación actual. Del mismo modo, la velocidad promedio de viaje se triplicó frente al caso actual de la vía.

Analizando los puntos anteriormente mencionados de esperarse una mejora en el tiempo de viaje que se tendrá en la vía. En la simulación más favorable, el tiempo se redujo un 32% aproximadamente, ahorrándose 17 minutos de viaje por la vía. Ello demuestra el beneficio del sistema de velocidad variable, manteniendo el diseño vial existente ha podido obtener el máximo posible de la vía a través del orden y la homogeneidad en el flujo.

9 CONSIDERACIONES PARA MECANISMOS DE GESTIÓN DE TRÁFICO

9.1 Educación vial

Una consideración importante para evitar complicar aún más los problemas de congestión vehicular es sin duda la educación vial para los usuarios, lo cual implica adquirir conocimientos sobre lo que es la vía pública, seguridad vial, accidentes de tráfico y movilidad sostenible. Por ello se propone que al momento de que el usuario tiene la necesidad de adquirir la licencia de conducir, se debe instruir al futuro conductor en temas de educación vial como también en los reglamentos de tránsito.

Para ello, es necesario que difundir la información necesaria para que la persona esté informada, esto debe partir creando hábitos y actitudes de convivencia, cultura ciudadana, calidad de vida, y respeto para los otros usuarios.

Se debe informar al usuario conductor sobre la seguridad vial, ya que este representa un tema de suma importancia correspondiente con la educación vial, el cual consiste en la prevención de accidentes de tráfico o la minimización de estos, esto para salvaguardar la vida y salud de todas las personas involucradas. Para ello, el conocimiento de los reglamentos de tránsito.

Fomentar el respeto por los demás usuarios para evitar accidentes de tránsito, esto refiere al tema de la agresividad de cambios de carril sin previo aviso del usuario que realiza la maniobra. Los cambios de carril corresponden a la maniobra del conductor para pasar de un carril al otro, para ello, se debe anticipar al conductor de atrás que se realizará dicha maniobra, y así, evitar accidentes.

Respetar los límites de velocidad también aporta en la seguridad vial, ya que si todos respetan dicho límite, se puede evitar accidentes, y contribuye en la disminución del congestión vehicular.

Adicionalmente, será importante comunicar e informar sobre los sistemas inteligentes de transportes (ITS), los cuales están siendo implementados con mayor fuerza alrededor del mundo y en unos años el Perú no será la excepción. Enfocándonos específicamente en el sistema de velocidad variable, será necesario explicar la forma en la que funciona el sistema, los beneficios que logra y como el conductor recibirá la información correspondiente a la vía cuando decida transcurrir en ella.

Será de vital importancia hacer entender al conductor el respetar el límite de velocidad establecido en los momentos de congestión, de lo contrario se generará el cuello de botella y no se mantendrá el flujo fluido.

9.2 Infraestructura y funcionamiento

El presente proyecto de tesis está enfocado en evaluar los beneficios de un modelo de velocidad variable, sin considerar la implementación en la vía al no contar con la infraestructura necesaria para ello en la actualidad. No obstante, es necesario plantear una infraestructura modelo que asegure el funcionamiento del sistema en caso se evalúe su implementación en un futuro. La funcionalidad del sistema radica en la interrelación entre la información de entrada con la de salida.

La información de entrada corresponde a la cantidad de vehículos que ingresan y salen de la vía, ello permitirá identificar la velocidad óptima requerida para asegurar el flujo continuo y evitar los cuellos de botella. Para ello se colocarán sensores tipo escáneres laser en conjunto con cámaras de vigilancia en todos los accesos y salidas de la vía, los cuales cuantificarán a cantidad de vehículos en toda la vía. Una vez se cuente con los radares instalados, será necesario crear una base de datos para el horario en el que se aplicará el sistema. Dicha base de datos es la que indicará diariamente la velocidad óptima a seguir y será complementada día a día con la información recibida por los radares.

Dicha información será trasladada a través de una red de fibra óptica la cual llevará la información al centro de gestión del tráfico. El centro de gestión del tráfico será quien se encargue del funcionamiento, mantenimiento de la vía en todo momento y tendrá la misión de reaccionar rápidamente ante alguna eventualidad que pueda generarse. Asimismo, debe verificar que los vehículos que transcurran por la vía respeten las velocidades establecidas asegurando así el funcionamiento del sistema, todo ello verificado a través de cámaras de vigilancia que se colocarán en la vía.

Los límites de velocidad serán mostrados a través de 2 tipos de señales: laterales y superiores dependiendo de las características que tiene cada tramo de la vía, como se observa en el plano posterior.

Con ambas consideraciones es posible la implementación y funcionamiento del sistema de velocidad variable, lo cual permitiría una mejora en los tiempos de traslado dentro de la vía

expresa Javier Prado, mejorando así el nivel de satisfacción de los conductores que transitan por la vía.

10 CONCLUSIONES

- La vía expresa Javier Prado tiene su hora pico entre las 7:30 a 9:30 pm, durante ese periodo se observó una congestión en ambos sentidos de la vía, llegando a obtener velocidades de circulación menores a 15 km/h en ese periodo de tiempo, generando largas colas de congestión y un tiempo de traslado total de 50 minutos aproximadamente.
- Entre las 7:30 a 9:30 pm, transcurrieron por la vía 19 500 vehículos aproximadamente, de los cuales el 56% se desplaza en el sentido Este a Oeste y el 44% restante en el sentido Oeste a Este.
- El modelo que se creó en la simulación para analizar el comportamiento de los vehículos en la red vial es un modelo correcto, ya que introduciendo los datos obtenidos mediante aforos se pudo obtener una simulación en la que se pudo representar la situación actual de la vía. Partiendo de los resultados obtenidos de la simulación, se puede determinar que los resultados y los datos obtenidos de los aforos realizados se relacionan.
- Al aplicar el sistema de velocidad variable el tiempo total de viaje se reduce en un 32%, representando en promedio 17 minutos menos de viaje en la vía.

11 RECOMENDACIONES

- El presente proyecto de tesis ha empleado el sistema de velocidad variable colocando una velocidad general para todos los carriles de la vía, Investigaciones futuras deberán analizar el comportamiento de la vía variando la velocidad por carriles.
- No han formado parte del alcance analizar los beneficios del sistema relacionados a la seguridad vial y la contaminación, futuros estudios deberán cuantificar dichos beneficios.
- Es recomendable acompañar el presente sistema con un sistema de gestión del tráfico para vías semaforizadas, mejorando así la congestión vehicular en toda la extensión de la Avenida Javier Prado.
- Se recomienda aplicar el modelo en otras avenidas de alto tránsito, como Paseo de la República, Panamericana Norte o Panamericana Sur y cuantificar los potenciales beneficios que generaría.
- Futuros estudios deberán analizar el costo económico que demandaría la implementación del sistema de velocidad variable en la ciudad de Lima.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE JAPON (JICA). (2013). Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao. Parte I y II

TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS (2014) Aimsun User's Manual v8.

ARNDT. (2016) ETSI - Intelligent Transport. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/intelligent-transport>.

CAL y MAYOR (2007) Ingeniería de tránsito. Alfaomega

CASAS, J., RUIZ, A., BREEN, M., PERARNAU, J., DELGADO, M., TORDAY, A. (2015) Quasi-dynamic model in Aimsun compared to static and dynamic models. http://atrf.info/papers/2015/files/ATRF2015_Resubmission_266.pdf

CIRCULA SEGURO. (2012). Centros de gestión del tráfico, los “ojos” de la DGT. (Consultado el 27 de setiembre) (<http://www.circulaseguro.com/centros-de-gestion-del-traffic-los-ojos-de-la-dgt/>)

CIUFFO, B., CASAS, M., MONTANINO, M., PERARNAU, J., PUNZO, V. (2014). Theory to practice: global sensitivity analysis of the Aimsun meso model. http://aimsun.s3.amazonaws.com/marketing/Press%202014/TEC_Mar2014_p09-17_Sensitivity%20Analysis.pdf

CORPORACIÓN ANDINA DE FOMENTO CAF (2010). Estudio del impacto vial en la red metropolitana de Lima y Callao por el flujo de carga del puerto, aeropuerto y zona de actividad logística.

DEYÁ, J. (2012). Análisis de los sistemas de velocidad variable.

EASYWAY. (2015). Traffic Management Services: Variable Speed Limits.

ESCORZA, M. CONSORCIO DE INVESTIGACIÓN ECONÓMICA Y SOCIAL CIES. (2016). Transporte Urbano: ¿Cómo resolver la movilidad en Lima y Callao?

GESTIÓN. (2014). Parque vehicular en Perú se incrementó en 63% en los últimos 10 años. (Consultado el 8 de septiembre) (<http://gestion.pe/economia/parque-vehicular-peru-se-incremento-63-ultimos-10-anos-2118060>)

GUÍO, F. (2010). Dispositivos reductores de velocidad vehicular: Hacia el desarrollo de nuevos diseños.

KOTUSEVSKI, G. HAWICK, K (2009). A Review of Traffic Simulation Software. *Computer Science*.

LIMA COMO VAMOS. (2015). Encuesta Lima cómo vamos.

LIN, X., YANG, X., LU, Y., ZOU, N. (2013). Optimal Variable Speed Limit Control for Real-time Freeway Congestions. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC). (2014). Manual de carreteras Diseño Geométrico DG-2014 (consultado el 20 de octubre) (http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_3580.pdf).

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES (2008) Guía de educación en seguridad vial para profesores y tutores de primaria (Consultado el 27 de setiembre) (<https://www.mtc.gob.pe/cnsv/educacion/Guias%20Educativas%20--/Guia%20Ed.Vial%20Primaria.pdf>)

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES (2016) Manual de dispositivos de control de tránsito automotor para calles y carreteras (Consultado el 27 de setiembre) (https://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/M anual%20Dispositivos%20Control%20Transito.pdf)

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES (2011) Reductores de velocidad tipo resalto para el sistema nacional de carreteras (SINAC). (Consultado el 27 de setiembre) (https://www.mtc.gob.pe/cnsv/area_legal/Normas%20Tecnicas/Directiva_N_01-2011MTC_Reductores_Velocidad_Tipo_Resalto.pdf)

MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES (2014) Sistemas inteligentes de transportes – ITS. (Consultado el 27 de setiembre) (http://www.proviasnac.gob.pe/archivos/file/documentos_de_interes/its-ugop2.pdf)

MOBILITY (2014) Variable speed limits. Texas A&M Transportaion Institute. (Consultado el 13 de octubre) (<https://mobility.tamu.edu/mip/strategies-pdfs/active-traffic/technical-summary/Variable-Speed-Limit-4-Pg.pdf>)

NARANJO, D. (2015). Análisis de la relación velocidad-densidad vehicular de la avenida calle 26 en Bogotá. Ingenio Magno, 6, pp. 76-88.

NISSAN, A., KOUTSOPOULOSB, H. (2011). Evaluation of the Impact of Advisory Variable Speed Limits on Motorway Capacity and Level of Service. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*

OROZCO, A., LLANO, G., MICHOUD, R. (2012). Redes vehiculares Ad-hoc: aplicaciones basadas en simulación. (Consultado el 13 de octubre) (<http://revistas.usc.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/51/43#.WfsoIPhDcs>).

MMP (2009). Plan Maestro de Movilidad para el Distrito Metropolitano de Quito. (Consultado el 13 de octubre). (<http://www.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/39699.pdf>)

RPP. (2014). APP: Se derrocha S/.13 mil millones al año por tráfico en Lima. (Consultado el 8 de septiembre) (<http://rpp.pe/economia/economia/aap-se-derrocha-s-13-mil-millones-al-ano-por-traffic-en-lima-noticia-741257>)

SANTA MARIA, E., FLORES, L., COARITA, E., VALERO, Y., MONTENEGRO, W. (2014). Diagnóstico y análisis del comportamiento del flujo vehicular y nivel de servicio de la Av. Javier Prado – Tramo Aviación a vía de Evitamiento.

SASTRE, D., BADILLO, M., Y MENÉNDEZ, J. (2010). Uso de escáneres láser en infraestructuras ITS para modelización del tráfico. Madrid, España.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (2010). Highway Capacity Manual. (Consultado el 3 de septiembre) (<http://hcm.trb.org/vol1?qr=1>).

WANG, Y., ZHANG, Y., HU, J., LI, L. (2012). Using variable speed limits to eliminate wide moving jams: a study based on three-phase traffic theory. *World scientific*.

13 ANEXOS

13.1 Longitud de la vía y tiempo de traslado sin trafico

13.3 Propuesta de infraestructura de velocidad variable planteada

13.4 Aforo de vehículos

13.4.1 Sentido Oeste – Este: Horario Noche Noche

1° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: O-E	N° VEHICULOS
06:30	06:45	585
06:45	07:00	573
07:00	07:15	543
07:15	07:30	549
07:30	07:45	534
07:45	08:00	562
08:00	08:15	635
08:15	08:30	602

3425

3° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: O-E	N° VEHICULOS
06:30	06:45	645
06:45	07:00	623
07:00	07:15	627
07:15	07:30	614
07:30	07:45	608
07:45	08:00	582
08:00	08:15	602
08:15	08:30	617

4918

2° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: O-E	N° VEHICULOS
06:30	06:45	626
06:45	07:00	642
07:00	07:15	602
07:15	07:30	593
07:30	07:45	572
07:45	08:00	565
08:00	08:15	608
08:15	08:30	632

3572

4° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: O-E	N° VEHICULOS
06:30	06:45	708
06:45	07:00	678
07:00	07:15	645
07:15	07:30	629
07:30	07:45	612
07:45	08:00	616
08:00	08:15	621
08:15	08:30	637

5146

13.4.2 Sentido Este – Oeste: Horario Noche

1° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: E-O	N° VEHICULOS
06:30	06:45	753
06:45	07:00	744
07:00	07:15	724
07:15	07:30	711
07:30	07:45	708
07:45	08:00	726
08:00	08:15	723
08:15	08:30	737

5826

3° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: E-O	N° VEHICULOS
06:30	06:45	711
06:45	07:00	713
07:00	07:15	702
07:15	07:30	691
07:30	07:45	693
07:45	08:00	716
08:00	08:15	735
08:15	08:30	738

5699

2° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: E-O	N° VEHICULOS
06:30	06:45	714
06:45	07:00	719
07:00	07:15	702
07:15	07:30	706
07:30	07:45	683
07:45	08:00	695
08:00	08:15	726
08:15	08:30	751

5696

4° PUNTO AFORO

HORA	SENTIDO: E-O	N° VEHICULOS
06:30	06:45	652
06:45	07:00	624
07:00	07:15	629
07:15	07:30	630
07:30	07:45	612
07:45	08:00	607
08:00	08:15	617
08:15	08:30	638

5009

13.5 Aforo de Velocidades

13.5.1 Sentido Oeste - Este

SENTIDO OESTE - ESTE

Velocidad	Unidad	Rango
5	km/h	2
8	km/h	2
4	km/h	1
8	km/h	2
11	km/h	3
11	km/h	3
9	km/h	2
4	km/h	1
6	km/h	2
7	km/h	2
6	km/h	2
7	km/h	2
4	km/h	1
4	km/h	1
4	km/h	1
7	km/h	2
12	km/h	3
3	km/h	1
4	km/h	1
5	km/h	2
7	km/h	2
3	km/h	1
4	km/h	1
3	km/h	1
5	km/h	2
3	km/h	1
4	km/h	1
5	km/h	2
2	km/h	1
3	km/h	1
3	km/h	1
5	km/h	2
6	km/h	2
11	km/h	3
12	km/h	3
7	km/h	2
9	km/h	2
6	km/h	2
8	km/h	2
4	km/h	1
3	km/h	1
5	km/h	2
5	km/h	2
5	km/h	2
9	km/h	2
8	km/h	2
4	km/h	1
6	km/h	2
6	km/h	2
5	km/h	2
9	km/h	2
12	km/h	3
13	km/h	3
16	km/h	4
14	km/h	3
6	km/h	2
9	km/h	2
14	km/h	3
10	km/h	3
8	km/h	2

RANGO DE VELOCIDADES	CANTIDAD DE VEHÍCULOS
[0 - 4]	18
[5 - 9]	31
[10 - 14]	10
[15 - 19]	1
[20 - 24]	0
[25 - 29]	0
[30 - 34]	0
[35 - 40]	0
	60

13.5.2 Sentido Este - Oeste

SENTIDO ESTE - OESTE

Velocidad	Unidad	Rango
15	Kh/h	1
18	Kh/h	1
25	Kh/h	3
30	Kh/h	4
25	Kh/h	3
22	Kh/h	2
21	Kh/h	2
26	Kh/h	3
27	Kh/h	3
15	Kh/h	1
16	Kh/h	1
19	Kh/h	1
20	Kh/h	2
27	Kh/h	3
32	Kh/h	4
25	Kh/h	3
36	Kh/h	4
21	Kh/h	2
25	Kh/h	3
18	Kh/h	1
15	Kh/h	1
24	Kh/h	2
28	Kh/h	3
16	Kh/h	1
17	Kh/h	1
28	Kh/h	3
30	Kh/h	4
36	Kh/h	5
32	Kh/h	4
32	Kh/h	4
34	Kh/h	4
25	Kh/h	3
25	Kh/h	3
27	Kh/h	3
20	Kh/h	2
22	Kh/h	2
19	Kh/h	1
18	Kh/h	1
16	Kh/h	1
17	Kh/h	1
26	Kh/h	3
24	Kh/h	2
28	Kh/h	3
25	Kh/h	3
23	Kh/h	2
30	Kh/h	4
32	Kh/h	4
32	Kh/h	4
35	Kh/h	5
30	Kh/h	4
18	Kh/h	1
25	Kh/h	3
24	Kh/h	2
24	Kh/h	2
23	Kh/h	2
25	Kh/h	3
26	Kh/h	3
27	Kh/h	3
20	Kh/h	2
22	Kh/h	2

RANGO DE VELOCIDADES	CANTIDAD DE VEHÍCULOS
[0 - 4]	0
[5 - 9]	0
[10 - 14]	0
[15 - 19]	34
[20 - 24]	28
[25 - 29]	32
[30 - 34]	23
[35 - 40]	3

120