

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**MICRO-SIMULACIÓN INTERMODAL EN LA CIUDAD DEL CUSCO  
EMPLEANDO LOS SOFTWARE VISSIM 8 Y VISWALK 8.**

Tesis para optar el título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

**Jordy Wilber Alvarez Vargas**

**ASESOR:** Ing. Félix Israel Cabrera Vega

Lima, abril de 2017



A mis queridos padres, mi hermano, mi asesor,  
profesores y seres queridos que me apoyaron  
en esta etapa.

## RESUMEN

El proyecto de ingeniería a desarrollar consta del estudio de una intersección ubicada en la ciudad de Cusco entre los distritos de Wanchaq y Cusco Cercado con el fin de evaluar las condiciones de los usuarios dentro de la misma. La evaluación se realizará mediante un modelo microscópico de tráfico (intersección), para luego presentar propuestas de mejoras a la situación inicial.

El análisis se realizará a través de los softwares computacionales Vissim 8.0 y Viswalk 8.0. Estos programas son capaces de simular el tráfico vehicular y peatonal de una zona de interés específico basándose en los datos recolectados en campo (flujo vehicular, flujo peatonal, ciclos de semáforos, geometría, etc.).

Para llevar a cabo este modelamiento, se procede a recrear la intersección virtualmente en los programas mencionados con todos los datos obtenidos en campo. Para conseguir la mayor similitud posible a la realidad, el modelo debe ser calibrado una vez terminado el procesamiento de datos. Esta calibración consta de ajustes numéricos entre la realidad y el modelo. En el caso de este estudio, se tomará en cuenta como parámetros de evaluación las longitudes de cola, la demora promedio y la velocidad promedio. Posteriormente, se procede a la validación del modelo, para lo cual se cambian los datos iniciales por nuevos datos de campo. Una vez terminado el modelo se procede a evaluar los parámetros de eficiencia y se propondrán alternativas según los resultados obtenidos. Estas pueden ser variaciones en términos de ciclos del semáforo hasta un rediseño vial si así ameritara el caso.

En este proyecto, se plantearon tres propuestas con la finalidad de mejorar la situación actual del tráfico peatonal y vehicular. De ellas se escogió la de mayor factibilidad en cuanto a la posibilidad de evaluación que se podía desarrollar. Esta alternativa se conformó de la propuesta de modificación de la geometría de la zona de estudio y de la optimización de los ciclos y fases de los semáforos que actúan en la intersección trabajada. Las modificaciones planteadas generaron cambios positivos en cuanto a la situación inicial estudiada; ya que se redujeron parámetros de eficiencia importantes como la longitud de cola (se redujeron 16 metros) de vehículos en la avenida de mayor afluencia (Av. San Martín). Además, en cuanto a los usuarios de a pie se les brindó mayores facilidades para movilizarse a través de las avenidas de la intersección analizada. Esto debido a que, se propusieron mejoras para la circulación de usuarios con discapacidad. Asimismo, se brindó mayor tiempo para la circulación peatonal (24 segundos adicionales) en el cruce de la Avenida Tullumayo que es la de mayor circulación peatonal.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Micro-simulación intermodal en la ciudad del Cusco empleando los software VISSIM 8 y VISWALK 8".  
Área : Movilidad y Transporte  
Asesor : Ing. Félix Israel Cabrera Vega  
Alumno : JORDY WILBER ALVAREZ VARGAS  
Código : 2010.0093.412  
Tema N° : # 6Z  
Fecha : Lima, 02 de febrero del 2017



INTRODUCCIÓN

Por las características del tráfico del Cusco, la forma más adecuada de representar la interacción entre vehículos y peatones es a través de los modelos de micro simulación. Pero para que estos sean válidos es necesario que se respeten sus fundamentos y se desarrollen obligatoriamente las etapas de calibración y validación. Lo anterior también incluye el uso de herramientas y pruebas estadísticas debido al carácter estocástico de la simulación. Además, los modelos peatonales que se empleen deben reconocer que las personas no se comportan como si fuesen gases o fluidos, sino que siguen patrones de auto organización y reaccionan al entorno. Finalmente, con estos modelos es posible evaluar el impacto de las medidas de mitigación que se puedan proponer para mejorar los desplazamientos de todos los usuarios.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar y evaluar las condiciones de circulación intermodal en una intersección de la ciudad del Cusco, mediante la creación de un modelo microscópico.

Objetivos específicos

Realizar un modelo de micro simulación considerando todas sus etapas: recolección de datos de campo, creación de la red, calibración y validación mediante pruebas estadísticas y múltiples corridas de la intersección elegida Además, presentar propuestas para mejorar la funcionalidad y seguridad de la intersección analizada.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ  
Av. Universitaria 1801, San Miguel  
Lima 32 - Perú  
T: (511) 626 2000 anexo 5501

[www.pucp.edu.pe/facultad/ingenieria](http://www.pucp.edu.pe/facultad/ingenieria)

## PROGRAMA DE TRABAJO

El desarrollo de la tesis considerará los siguientes temas:

- a) Planteamiento del problema y objetivos de la investigación
- b) Antecedentes: gestión de la movilidad sostenible, intersecciones, modelos de tráfico vehicular, simulación de tráfico, fundamentos de la micro simulación de tráfico.
- c) Metodología de la investigación.
- d) Resultados.
- e) Conclusiones y recomendaciones.

## METODOLOGÍA

La recolección y análisis de la información se desarrollará en 6 etapas: la recolección de los datos de campo mediante técnicas manuales y filmaciones; la extracción de la información de los videos en forma manual; la construcción de la red en VISSIM 8.0 y VISWALK 8.0; la calibración y validación del modelo mediante pruebas no paramétricas y un nivel de confianza del 95%; las corridas del modelo con los diferentes valores de los parámetros del modelo de la fuerza social y el análisis estadístico de los resultados. Finalmente, la evaluación de las propuestas de mejora.

## REVISIONES

### Primera Revisión:

- Objetivo general y objetivos específicos.
- Antecedentes

### Segunda Revisión

- Metodología del trabajo.
- Recolección de datos de campo.

### Tercera Revisión:

- Procesamiento y análisis de la información de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

## NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ  
Av. Universitaria 1801, San Miguel  
Lima 32 - Perú  
T: (51 1) 626 2000 anexo 5501

[www.pucp.edu.pe/facultad/ingenieria](http://www.pucp.edu.pe/facultad/ingenieria)



## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general.....	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
1.2 Alcances y limitaciones.....	2
1.3 Justificación.....	3
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1 Modelo y sistema.....	5
2.2 Modelo del tráfico.....	5
2.2.1. Tipos de modelación del tráfico.....	5
➤ Modelos discretos.....	6
➤ Modelos continuos.....	6
➤ Modelos determinísticos.....	7
➤ Modelos estocásticos.....	7
➤ Modelos macroscópicos.....	7
➤ Modelos mesoscópicos.....	7
➤ Modelos microscópicos.....	8
2.3. Micro-simulación del tráfico.....	8
2.4. Fundamentos de la micro-simulación.....	9
2.4.1. Nivel de aleatoriedad en el flujo del tráfico.....	9
2.4.2. Número de semilla.....	9
2.4.3. Número de corridas.....	9
2.4.4. Warm up (tiempo de estabilidad).....	13
2.4.5. Interacción de vehículos.....	14
2.4.6. Calibración del modelo.....	14
2.4.7. Validación del modelo.....	15
2.5. Modelos de seguimiento vehicular (car following).....	15
2.5.1. Modelo de la General Motor.....	15
2.5.2. Modelo de Gipps.....	17
2.5.3. Modelo de Wiedemann.....	19
2.6. Modelos de cambio de carril.....	20
➤ Cambio de carril necesario.....	20
➤ Cambio de carril libre.....	21
2.7. Micro-simulación peatonal.....	22

2.7.1. Modelo de la Fuerza Social (Social Force Model).....	22
<b>CAPÍTULO 3. VISSIM SOFTWARE DE MICRO-SIMULACIÓN</b>	<b>24</b>
3.1. Vissim.....	24
3.2. Antecedentes de Vissim.....	24
3.3. Funcionamiento del software Vissim.....	24
3.4. Componente estático.....	26
3.5. Componente dinámico.....	26
3.6. Infraestructura del modelo.....	26
3.6.1 Link y conectores.....	26
3.6.2 Otros elementos del modelo.....	27
3.7. Control del tráfico.....	28
3.7.1 Intersecciones no semaforizadas.....	28
3.7.2 Intersecciones semaforizadas.....	29
3.8. Consideración del modelo.....	30
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA, RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO</b>	<b>32</b>
4.1. Metodología.....	32
4.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO.....	35
4.2.1 Elección de la intersección de análisis.....	35
4.2.2 Elección del equipo de trabajo y registro de datos de campo.....	36
4.2.3 Recolección de datos de campo.....	37
➤ Videograbación.....	37
➤ Longitud de cola.....	38
➤ Aforo vehicular.....	38
➤ Aforo peatonal.....	39
➤ Tiempo de semáforos.....	40
➤ Geometría de la zona de estudio.....	40
➤ Lista de chequeos.....	40
4.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO.....	41
➤ Videograbación.....	41
➤ Longitud de cola.....	42
➤ Aforo vehicular.....	43
➤ Aforo peatonal.....	44
➤ Tiempo de semáforos.....	44
➤ Geometría de la zona de estudio.....	46
➤ Lista de chequeos.....	46

<b>CAPÍTULO 5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA INTERSECCIÓN ESTUDIADA</b>	<b>47</b>
5.1. Construcción del modelo.....	47
5.1.1 Imagen de fondo (Background).....	47
5.1.2 Link y conectores.....	47
5.1.3 Composición de vehículos y peatones.....	48
5.1.4 Ingreso de datos.....	49
➤ Entrada de vehículos y peatones .....	49
➤ Asignación de rutas (vehicule routes-static).....	50
5.1.5 Señales de control.....	50
5.1.6 Reglas de Prioridad.....	51
5.2. Verificación del modelo .....	53
5.3. Calibración del modelo .....	53
5.3.1 Parámetros de análisis.....	54
5.4. Validación del modelo.....	59
<b>CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MICRO-SIMULACIÓN INTERMODAL DESARROLLADA</b>	<b>62</b>
6.1. Análisis de resultados.....	62
➤ Longitudes de cola.....	63
➤ Velocidades de viaje.....	63
➤ Demora de viaje.....	64
6.2. Propuestas de mejora.....	64
6.3. Evaluación estadística de la propuesta de mejora desarrollada.....	69
➤ Verificación de extremo positivo.....	70
➤ Verificación de extremo negativo.....	70
6.3.1 Evaluación de velocidad promedio.....	71
➤ Propuesta de mejora desarrollada caso vehicular.....	71
6.3.2. Evaluación de la demora promedio.....	72
➤ Propuesta de mejora desarrollada caso vehicular.....	72
➤ Propuesta de mejora desarrollada caso peatonal.....	73
6.3.3. Evaluación de las longitudes de colas.....	74
➤ Propuesta de mejora desarrollada.....	74
<b>CAPITULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>80</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Intersección compleja multimodal .....	4
Figura 2. Intersección con diferentes medios de transporte.....	4
Figura 3. Criterios para clasificar los modelos.....	6
Figura 4. Principales estrategias de simulación del tráfico.....	8
Figura 5. Proceso iterativo recomendado por FHWA.....	12
Figura 6. Representación no estabilizada del modelo .....	13
Figura 7. Representación estabilizada del modelo.....	14
Figura 8. Seguimiento vehicular modelo General Motors .....	16
Figura 9. Fases del modelo de Wiedemann .....	18
Figura 10. Cambio de carril necesario .....	21
Figura 11. Cambio de carril libre .....	21
Figura 12. Modelo de la Fuerza Social.....	23
Figura 13. La arquitectura del sistema de Vissim .....	25
Figura 14. Modelo de rotonda en construcción .....	27
Figura 15. Concepto de modelación con regla de prioridades .....	29
Figura 16. Intersección semaforizada .....	30
Figura 17. Metodología propuesta para el desarrollo del estudio .....	34
Figura 18. Vista satelital de la zona de estudio .....	36
Figura 19. Samsung Galaxy S7 Edge .....	37
Figura 20. Sony Handycam Vision .....	37
Figura 21. Organización de longitudes de cola .....	38
Figura 22. Ubicación de los semáforos .....	40
Figura 23. Ubicación del equipo de filmación .....	40
Figura 24. Diagrama de flujo Av. San Martin .....	43
Figura 25. Puntos de recolección de peatones .....	44
Figura 26. Ciclos de la intersección.....	45
Figura 27. Duración de fases de los semáforos vehiculares .....	45
Figura 28. Duración de fases de los semáforos peatonales .....	45
Figura 29. Imagen de fondo utilizada .....	47
Figura 30. Recuadro de interacción de creación de un link .....	48

Figura 31. Entorno Vehicle Compositions .....	48
Figura 32. Entorno Pedestrian Compositions.....	49
Figura 33. Tiempos de los semáforos y grupos de señales.....	51
Figura 34. Áreas de conflicto.....	52
Figura 35. Reglas de prioridad.....	52
Figura 36. Intervalo evaluado para la calibración.....	54
Figura 37. Diagrama de calibración vehicular .....	57
Figura 38. Diagrama de calibración peatonal .....	58
Figura 39. Diagrama de flujo Av. San Martin .....	59
Figura 40. Diagrama de validación vehicular .....	60
Figura 41. Diagrama de validación peatonal .....	61
Figura 42. Uso del software Auto TURN .....	65
Figura 43. Intersección estado actual .....	66
Figura 44. Intersección con mejoras aplicadas .....	67
Figura 45. Fases y ciclos de los semáforos .....	68
Figura 46. Prueba de hipótesis para el extremo positivo .....	70
Figura 47. Prueba de hipótesis para el extremo negativo .....	70
Figura 48. Diagrama de evaluación de la velocidad promedio .....	71
Figura 49. Diagrama de evaluación de la demora promedio vehicular .....	72
Figura 50. Diagrama de evaluación de la demora promedio peatonal .....	73
Figura 51. Diagrama de evaluación de la cola promedio Calle Regional.....	74
Figura 52. Diagrama de evaluación de la cola promedio Av. San Martin .....	75
Figura 53. Diagrama de evaluación de la cola promedio Av. El Sol .....	76
Figura 54. Diagrama de evaluación de la cola promedio Av. Tullumayo .....	77

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Desviación estándar muestral .....	10
Ecuación 2: Intervalo de confianza .....	10
Ecuación 3: N° mínimo de corridas .....	10
Ecuación 4: Velocidad deseada final .....	17
Ecuación 5: Caso de seguimiento vehicular.....	18
Ecuación 6: Caso de conducción libre.....	18
Ecuación 7: Ecuación de la Fuerza Social .....	22
Ecuación 8: Distancia requerida .....	31
Ecuación 9: Formas de agrupación de datos .....	56



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Registro de aforo vehicular.....	39
Tabla 2. Tabla de registro de aforo peatonal.....	39
Tabla 3. Longitudes de cola.....	42
Tabla 4. Distribución de Aforo vehicular avenida San Martin.....	43
Tabla 5. Distribución de Aforo peatonal del punto I al punto II.....	44
Tabla 6. Volúmenes vehiculares.....	49
Tabla 7. Volúmenes peatonales.....	50
Tabla 8. Distribución de aforo vehicular calle Regional.....	50
Tabla 9. Parámetros y resultados en cada intento ejecutado.....	55
Tabla 10. Datos obtenidos de campo y software para la calibración vehicular.....	57
Tabla 11. Datos obtenidos de campo y software para la calibración peatonal.....	58
Tabla 12. Datos obtenidos de campo y software para la validación vehicular.....	60
Tabla 13. Datos obtenidos de campo y software para la validación peatonal.....	61
Tabla 14. Demanda vehicular de calibración y validación.....	62
Tabla 15. Demanda peatonal de calibración y validación.....	62
Tabla 16. Longitudes de cola promedio.....	63
Tabla 17. Comparación de longitudes de cola.....	69

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El aumento notorio del parque automotor, debido al crecimiento económico sostenido del país en la última década, ha originado dificultades y problemas que presentan los usuarios a la hora de circular por las calles de las distintas ciudades del territorio nacional. Este conflicto no es ajeno a la ciudad del Cusco, donde los congestionamientos vehiculares son ya una rutina para los usuarios. En las avenidas principales e intersecciones de las mismas, la infraestructura vial es muy precaria en lo que respecta al diseño, semáforos, señales de tránsito, ente otros. Por estos motivos, uno de los objetivos principales de este proyecto es el de realizar un correcto estudio vial para construir un modelo de micro-simulación adecuado y respetando todas sus etapas necesarias.

A lo largo de los años, se han realizado avances en el área de movilidad y transporte mediante la creación de softwares de ayuda en el análisis del tráfico. Uno de ellos es el programa Vissim, el cual es un software que se basa en un enfoque que se podría denominar de alcance “celular”; ya que emplea para el análisis el modelo microscópico.

El mencionado programa fue desarrollado en Alemania en la década de los setenta. El uso de Vissim se expandió primero por el continente europeo. Actualmente, ya es utilizado en distintos países latinoamericanos para evaluar las condiciones de circulación.

Debido a los buenos resultados que se han obtenido al emplear esta herramienta computacional en distintas ciudades del mundo, en el presente proyecto de ingeniería se le utilizará para el análisis de una intersección compuesta por 4 entradas y 4 salidas, en la intersección de los distritos de Wanchaq y Cusco-Cercado en la ciudad del Cusco, Perú, y evidenciar que mediante una correcta organización y estudio, se pueden resolver o disminuir los problemas del diseño vial y de la circulación de los diversos usuarios.

La realización del modelo microscópico de esta intersección constará de distintas etapas. En primer lugar, se elaborará la recolección de datos de campo y su procesamiento. Estos, que servirán como base para el uso del Vissim, comprenden el aforo vehicular, el aforo peatonal, fases de los semáforos, geometría del lugar, etc.

Después, se procede a la programación de la red por medio del software elegido y su posterior verificación, es decir, cerciorarse de que los datos se hayan ingresado sin errores. Luego de culminada la etapa de verificación, se procede con la

calibración y validación del modelo. Estas etapas se presentarán a en mayor detalle en la metodología del proyecto presente. Además, con el fin de obtener un análisis más detallado se empleará, para el aforo peatonal, el software Viswalk 8. Este programa está dedicado a la simulación microscópica peatonal. Esta herramienta computacional procede de los mismos desarrolladores que Vissim; ya que ambos softwares pertenecen a PTV (Planung Transport Verkehr).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

- Analizar y evaluar las condiciones de circulación intermodal en una intersección de la ciudad del Cusco, mediante la creación de un modelo microscópico.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Realizar un modelo de micro-simulación considerando todas sus etapas: recolección de datos de campo, creación de la red, calibración y validación mediante pruebas estadísticas y múltiples corridas de la intersección elegida.
- Presentar propuestas para mejorar la funcionalidad y seguridad de la intersección.

## **1.2 Alcances y limitaciones**

El alcance de esta tesis es el estudio de la intersección formada por la avenida El Sol, avenida Tullumayo, avenida San Martín y la calle Regional. El lugar de estudio se encuentra ubicado en la intersección de los distritos de Wanchaq y Cusco Cercado. El control del tráfico está dado por semáforos de tres fases.

En el desarrollo del proyecto de micro-simulación se utilizará el programa Vissim 8.0; por ende, los resultados obtenidos no deben ser extrapolados a versiones anteriores; ya que no cuentan con las mismas características de la versión empleada y no son compatibles. La recolección de datos, para la realización del modelo, fue desarrollada durante el segundo semestre del año 2016. Específicamente, cuando la demanda de los usuarios es diferente al resto del tiempo anual. Esto porque en estas fechas se dan vacaciones académicas (tanto a nivel de colegios como universidades). Por lo tanto, las mejoras y medidas que se podrían plantear dependerán del periodo de tiempo en el cual sea analizada la intersección; ya que el tráfico variará dependiendo de la época del año. Y, además las propuestas no funcionarán adecuadamente en los próximos años por las condiciones dinámicas del tráfico vehicular.

### 1.3 Justificación

A lo largo del tiempo se han elaborado estudios sobre el tráfico y su funcionamiento empleando distintas consideraciones para analizarlo. Los modelos determinísticos y estocásticos destacan entre las más utilizadas. El primero de los modelos es considerado como aquel en el que se tiene pleno conocimiento de la información pertinente. Por lo cual, se asocia a condiciones sencillas de tráfico. En cuanto al segundo modelo, se utiliza cuando se presentan algunas variables que no son conocidas como la congestión, accidentes, tipos de conductores, etc.

El software Vissim hace uso del modelo estocástico por lo que es capaz de representar distintos casos de aplicación como tráfico de autopistas, intersecciones, ovalos, etc. Este programa a través de su modelo microscópico puede representar el tráfico del país; ya que cuenta con diversos parámetros ajustables a los distintos tipos de situaciones que se podrían presentar a la hora de abordar el problema del tráfico. Un ejemplo de lo mencionado es la variable conocida como número semilla, que se encarga de variar el tipo de vehículos y la actitud de los conductores en el modelo.

Por lo antes mencionado, es que se empleará el modelo microscópico del software Vissim en su versión 8.0 para analizar la intersección elegida. El comportamiento individual de cada vehículo será considerado en la interacción vehicular. De esta manera, se utilizarán los parámetros de eficiencia designados (tiempo de viajes, longitud de colas, etc.) en el estudio de la situación actual de la intersección del proyecto. Asimismo, se hará uso de la herramienta computacional Viswalk 8 para el estudio del comportamiento de los peatones. Al igual que en Vissim se requieren parámetros de control (la reacción de los peatones, densidad de peatones, influencia de la posición del peatón, etc.) que se elegirán en el desarrollo del proyecto presente.

Como una ilustración del tema, para su mejor comprensión, se presentan las imágenes 1 y 2, en las que se observa el estudio de dos intersecciones. La primera es una simulación multimodal compleja de una intersección ubicada en Mendelssohnplatz en Karlsruhe, Alemania. Dentro de esta red vial, se aprecia que existe la formación de colas en dos de sus entradas debido a la alta afluencia vehicular por la importancia de la intersección analizada.

Por otro lado, en la figura 2 se tiene una intersección ubicada en el Puente Kuss, en Estrasburgo, Francia. En ella se observa una simulación multimodal menos compleja que la primera, pero en un espacio más reducido dada las condiciones de su importancia y ubicación. En ambos casos mencionados se considera la presencia de movimientos laterales, cambio de carriles y seguimiento vehicular.



Figura 1. Intersección compleja multimodal.

Fuente: [www.ptvgroup.com](http://www.ptvgroup.com) (2016)



Figura 2. Intersección con diferentes modos de transporte.

Fuente: [www.ptvgroup.com](http://www.ptvgroup.com) (2016)



## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Modelo y sistema**

Un modelo es una forma de representación sencilla de un sistema con el fin de facilitar su entendimiento y controlar su comportamiento (Aguirre, 2015). En el caso del proyecto, al desarrollar un modelo de micro-simulación se busca replicar el comportamiento del tráfico de la intersección escogida para su posterior análisis. Por otro lado, un sistema se suele definir como una colección de entidades que interactúan entre sí hacia un fin lógico. (Schmidt & Taylor, 1970).

El sistema, en este trabajo, está conformado por los siguientes elementos: las avenidas Tullumayo, El Sol, San Martín y la Calle Regional, y también por los peatones, vehículos, etc. Los primeros mencionados son la geometría del proyecto. Por otro lado, los otros elementos mencionados son representaciones del componente dinámico del modelo.

### **2.2 Modelo del tráfico**

Es el concepto mediante el cual un sistema de transporte (cruces de autopistas, avenidas, rotondas, etc.) es llevado de la realidad a una representación virtual para el análisis de su comportamiento, usando un modelo estocástico y la ayuda de un software de computadora (Pursula, 1999).

La modelación posibilita estudiar la presente y futura situación del flujo vehicular de la zona elegida mediante la recolección de datos en campo que se expresarán mediante parámetros en la realización del modelamiento.

#### **2.2.1. Tipos de modelación del tráfico**

La clasificación de los modelos, empleados para efectuar el estudio de un proyecto, se puede realizar de distintas maneras. Por ejemplo, se pueden ordenar de acuerdo al tipo de proyecto a realizar y el fin del mismo. En este estudio se contemplarán los tipos de modelos primordiales que se emplearán en el desarrollo del presente trabajo. Los mismos que se pueden apreciar en la figura 3, donde se muestra una organización de los modelos de acuerdo a su naturaleza (continuos o discretos), según su nivel de detalle (macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos) y por su nivel de aleatoriedad (determinísticos o estocásticos).



Figura 3. Criterios para clasificar los modelos.

Fuente: elaboración propia.

➤ **Modelos discretos**

Estos modelos se destacan por considerar una modelación de un sistema por medio de una representación en la cual los estados de las variables cambian instantáneamente en instante de tiempo separados (Gallardo, 2011). Por ejemplo, en un modelo de flujo de tráfico en una autopista las características y el movimiento individual de los vehículos varían constantemente en instantes distintos.

➤ **Modelos continuos**

Son aquellos que involucran ecuaciones matemáticas diferenciales que relacionan tasas de cambio de las variables o parámetros en el tiempo. Además, las variables que se emplean en el modelo cambian constantemente. Por ejemplo, el

comportamiento del tráfico en una intersección, la velocidad de los vehículos, las longitudes de cola, etc. (Aguirre, 2015).

Después de haber introducido los dos primeros modelos de acuerdo a su naturaleza, se debe mencionar que también se pueden clasificar según su predictibilidad. Esto según el tipo de proyecto y el fin con el que se desee desarrollar el mismo. Esta clasificación corresponde a los modelos determinísticos y estocásticos que se explicaran a continuación.

➤ **Modelos determinísticos**

Son modelos cuya solución para determinadas condiciones es única y siempre la misma, también son aquellos donde se supone que los datos se conocen con certeza, es decir, se supone que cuando el modelo sea analizado se tiene disponible toda la información necesaria para la toma de decisiones (Pimentel, 2014).

➤ **Modelos estocásticos**

El modelo estocástico, opuesto al modelo determinístico, contiene uno o más parámetros (variables endógenas) aleatorias. Por lo que, se genera un conjunto de respuestas cuando es utilizado para efectuar un estudio. Los resultados obtenidos mediante el uso de este modelo son empleados para estimar el comportamiento real de un sistema (Chávez, 2012). El programa Vissim es un ejemplo de software que maneja este modelo.

➤ **Modelos macroscópicos**

Los modelos macroscópicos se caracterizan por ser representaciones continuas del flujo de tránsito, se refieren a medidas generales como la relación entre flujo, velocidad, y densidad. Estas características del modelo pierden mucho detalle, pero ganan en habilidad para tratar los problemas de dimensiones colosales dentro de tiempos de ejecución cortos (Arrieta, 2013).

➤ **Modelos mesoscópicos**

La metodología de estos modelos consiste en simular un conjunto reducido de vehículos como si fueran uno solo. Esto no quiere decir que los vehículos se analizarán como conjunto del todo; ya que en el caso de algunos parámetros como los de giros, tiempos de entrada y salida se evaluarán de manera individual (Suarez, 2007). Por otro lado, los vehículos y el comportamiento del conductor no son distinguidos ni descritos individualmente, si no en términos con funciones de distribución de probabilidad. Estas distribuciones dependen de varias variables (aceleración, interacción entre vehículos, cambios de carril, etc.) que describirán el

comportamiento de cada conductor (Holgado, 2012). En la figura 4 se ilustra las consideraciones que pertenecen a cada modelo, según el nivel de detalle de la simulación.



Figura 4. Principales estrategias de simulación del tráfico.

Fuente: Adaptado de [www.proyecto40.com](http://www.proyecto40.com). (2015)

### ➤ Modelos microscópicos

Los modelos microscópicos son aquellos que se centran en el comportamiento individual de cada vehículo para obtener el comportamiento global del tráfico en una vía. Tienen en cuenta, por tanto, los parámetros interrelacionados que determinan la dinámica de los vehículos. Así, por ejemplo, conociendo la aceleración de cada vehículo en cada instante, se puede saber, dada su posición y velocidad, cual será su situación tras un intervalo de tiempo (Vico et al., 2014).

### 2.3. Micro-simulación del tráfico

El uso de los modelos microscópicos con fines de simulación ha ido aumentando a pasos agigantados en este último siglo. Estos han sido empleados para el estudio y análisis del tráfico (su comportamiento, problemas, soluciones, etc.). El hecho de poder tratar tal cantidad de información plantea la posibilidad de enfocar el problema del tráfico a nivel “celular”; es decir, considerando a cada vehículo como un objeto independiente que se enmarca dentro de un sistema (flujo de tráfico) y que por el cual se puede interactuar con otros componentes del mismo sistema como por ejemplo el resto de vehículos (Salvador & Robusté, 2000). Uno de los programas que basan su estudio en el modelo microscópico es el software computacional Vissim.

## **2.4. Fundamentos de la micro-simulación**

Los fundamentos de la micro-simulación son la base del análisis que se desarrolla a lo largo de este trabajo con el fin de lograr los objetivos propuestos. Entre ellos destacan la aleatoriedad del modelo, el warm up o tiempo de estabilidad, la interacción vehicular, la calibración del modelo y la validación del mismo.

### **2.4.1. Nivel de aleatoriedad en el flujo del tráfico**

El nivel de aleatoriedad en un flujo de tráfico se relaciona directamente con sus parámetros; ya que en estos se refleja el comportamiento y funcionamiento del tránsito estudiado. Esta aleatoriedad se puede presentar de manera determinística o estocástica. Entre estas dos representaciones existen diferencias marcadas. En el caso de una manifestación estocástica, se tiene una característica propia en referencia al tipo de manejo de los conductores y sus vehículos a partir de las estadísticas. Mientras que, en una muestra determinística, no se observan variaciones respecto a las particularidades de vehículos y conductores.

### **2.4.2. Número semilla**

Los análisis dentro de los modelos que empleen simulaciones deben de utilizar números aleatorios generados a partir de un solo valor inicial (semilla) dentro de cada análisis para minimizar los errores en la simulación aleatoria (Weinstein et al., 2003). Esto en el modelo se observa con el cambio de comportamiento de los conductores (gentil, agresivo, etc.) y los tipos de vehículos participantes (motos, camiones, buses, etc.). Cada vez que se cambie este número denominado "semilla", estos parámetros variarán generando distintos patrones de comportamiento y flujo vehicular.

### **2.4.3. Número de corridas**

El número semilla, definido anteriormente, tendrá una influencia directa a la hora de realizar el análisis de un modelo microscópico; ya que este se encarga de que cada corrida realizada sea distinta de cualquier otra que se haya efectuado. Los resultados obtenidos, normalmente, se encuentran en un rango cercano al promedio de las respuestas alcanzadas en las corridas llevadas a cabo. Los datos obtenidos de las corridas se deben validar a través de un número mínimo de corridas (Fellendorf & Vortich, 2010). Este número de corridas específico, se conseguirá con ayuda de la estadística. Por lo tanto, se debe tomar una muestra que represente a la población (corridas) de forma adecuada, es decir esta debe ser heterogénea y sin tendencias de ninguna clase. Mientras mejor se represente a la población en la muestra de trabajo, mejores serán los resultados a la hora de extrapolarlos a la población total (Fernández, 2015).

Finalmente, para realizar este análisis estadístico se necesitará de las siguientes ecuaciones estadísticas:

Ecuación 1

$$S^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Donde:

S: desviación estándar

X: respuesta del parámetro de eficiencia en una corrida específica

$\bar{x}$ : media del parámetro en todas las corridas

N: número de corridas

La Federal Highway Administration (FHWA) sugiere emplear la distribución “T student” con el fin de obtener el mínimo número de corridas, por lo que se emplean las siguientes expresiones:

Ecuación 2

$$CI_{(1-\alpha\%)} = 2 * t_{(\alpha/2), N-1} * \frac{S}{\sqrt{N}}$$

Donde:

CI: intervalo de confianza

$t_{(\alpha/2)}$ : t-student con N-1 grados de libertad

N: número de corridas

S: desviación estándar

El número mínimo de corridas, según los estudios elaborados por la FHWA (2004), se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 3

$$N = \left( t_{\alpha/2} * \frac{S}{e} \right)^2$$

Donde:

N: número mínimo de corridas

$t_{(\alpha/2)}$ : t-student con N-1 grados de libertad

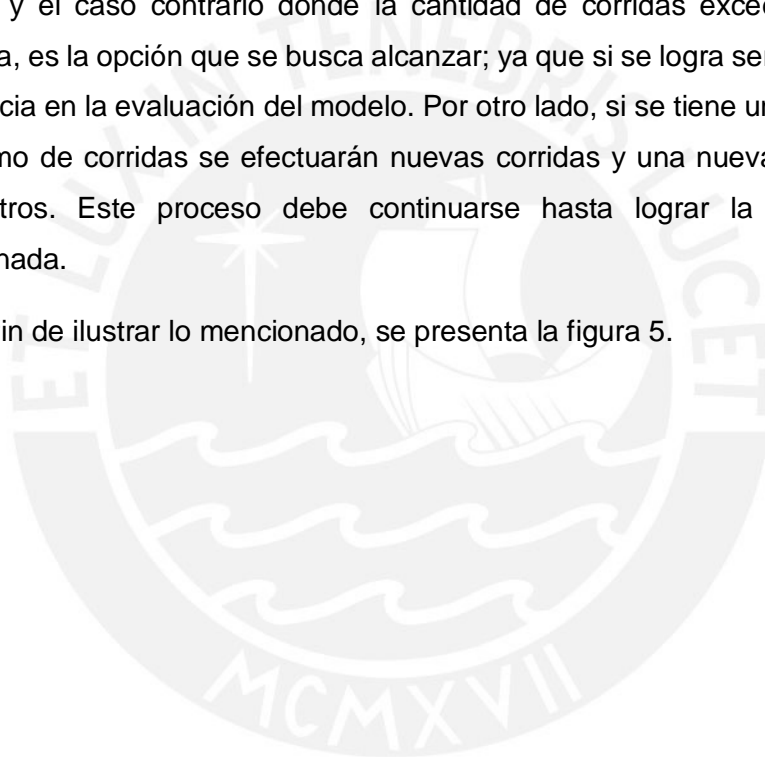
S: desviación estándar

e: margen de error

El proceso de análisis que propone, la Federal Highway Administration (FHWA), para calcular el número mínimo de corridas consta de los siguientes pasos: Para comenzar, se evalúa el modelo trabajado con un número de al menos 4 corridas. Después, mediante el uso de las ecuaciones antes expresadas, se debe obtener la media, la desviación estándar y el nivel de confiabilidad. Cuando se realizan cálculos estadísticos como los mencionados, es necesario tomar en cuenta el margen de error posible en los resultados obtenidos.

Al final del proceso, se realiza el cálculo de las repeticiones mínimas, mediante la ecuación 3, para su posterior comparación con el número de corridas del modelo. Se considerará dos posibles opciones. Si el número de corridas realizadas es menor al mínimo y el caso contrario donde la cantidad de corridas exceda al mínimo. La segunda, es la opción que se busca alcanzar; ya que si se logra será un indicador de suficiencia en la evaluación del modelo. Por otro lado, si se tiene un menor valor que el mínimo de corridas se efectuarán nuevas corridas y una nueva medición de los parámetros. Este proceso debe continuarse hasta lograr la segunda opción mencionada.

Con el fin de ilustrar lo mencionado, se presenta la figura 5.



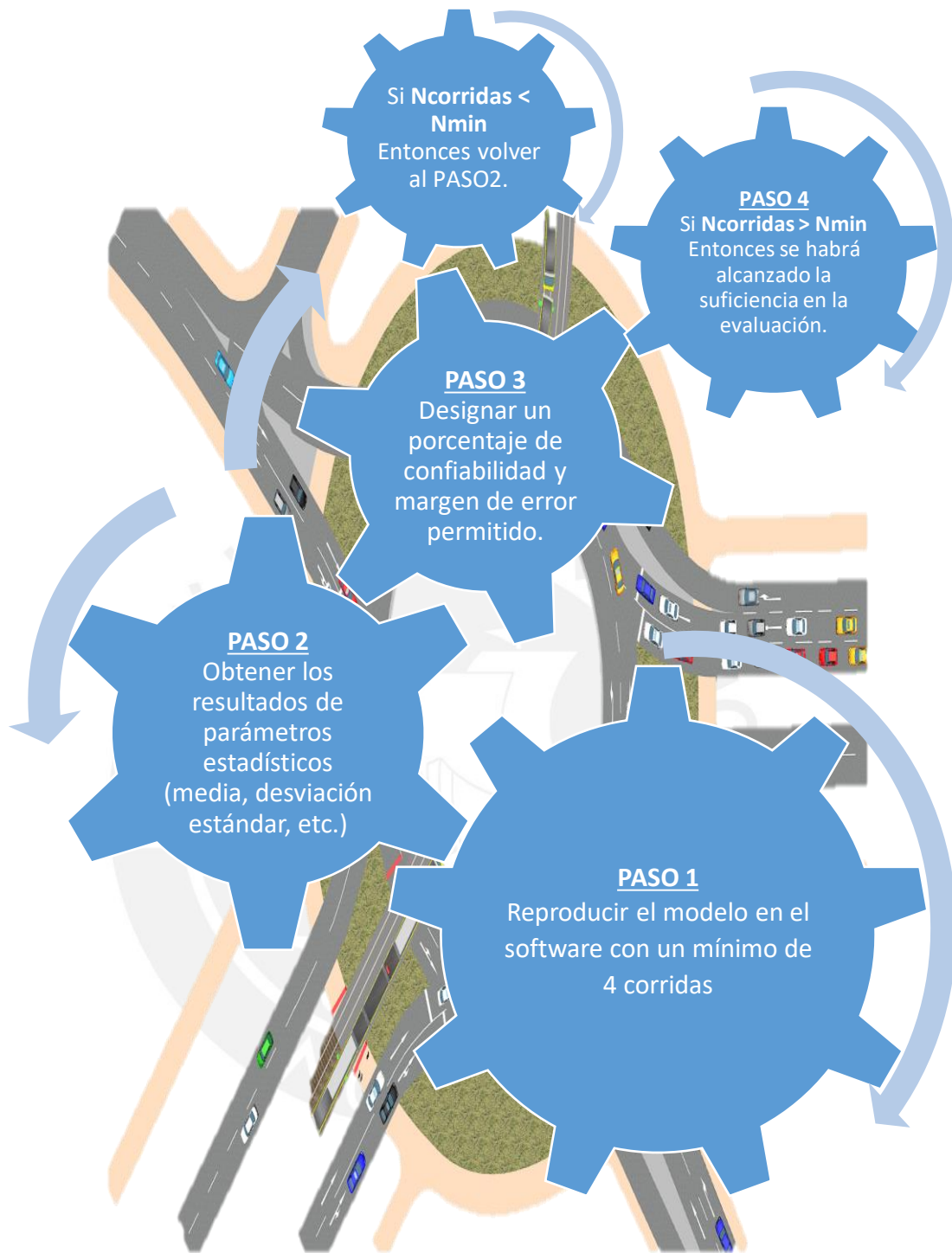


Figura 5. Proceso Iterativo para determinar el número de corridas

Fuente: Adaptado de FHWA (2004)



#### 2.4.4. Warm up (tiempo de estabilidad)

El warm up o tiempo de estabilidad es aquel en el cual el flujo de tráfico, en el modelo de la simulación, alcanza el equilibrio. En otras palabras, se logra la estabilidad vehicular. Una vez alcanzado este punto en la simulación, se puede proceder a la recolección de datos estadísticos. Esta información se compone del análisis de parámetros de eficiencia como la longitud de colas, el tiempo de viaje, etc. (Dowling et al, 2004).

El warm up debe extenderse durante el tiempo suficiente antes del período de calibración del modelo requerido para demostrar la existencia de densidades de tráfico suficientes en el proyecto que se trabaja (NSW, 2013). Según la FHWA se obtuvo que el tiempo de estabilización para modelos elaborados (warm up) es de como mínimo 10 minutos de simulación.

En las siguientes imágenes, se puede observar representaciones del modelo cuando no se alcanza la estabilidad (figura 6) y cuando si se produce (figura 7). Además, el tiempo que necesitó el modelo (en el ejemplo) para alcanzar su estabilización fue de 20 minutos como se puede apreciar en las ilustraciones.

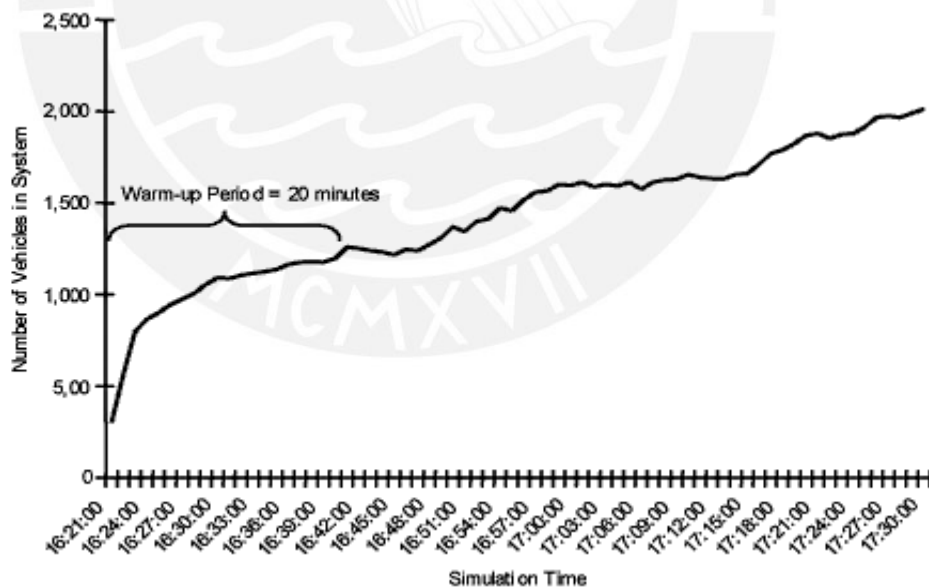


Figura 6. Representación no estabilizada del modelo

Fuente: FHWA (2004)

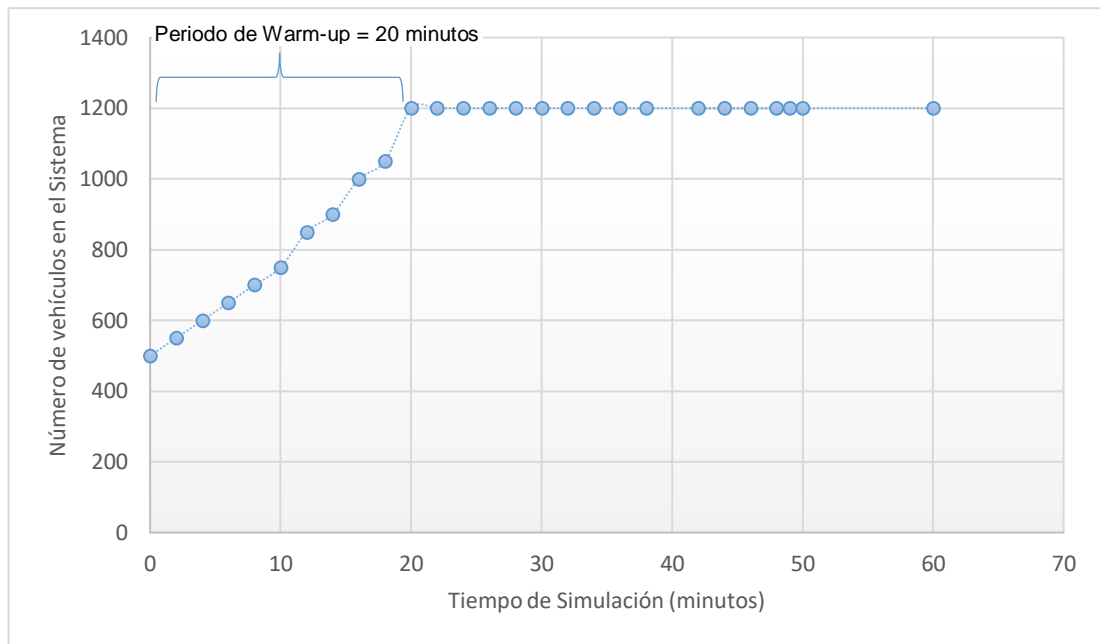


Figura 7. Representación estabilizada del modelo

Fuente: Adaptado de FHWA (2004)

#### 2.4.5. Interacción de vehículos

La interacción de vehículos es una característica propia de los modelos de simulación microscópicos. Esta se realiza a través de modelos de cambio de carril y seguimiento vehicular (Fellendorf & Vortisch, 2010). En adición a estos modelos, se añade por parte del software Vissim el comportamiento no basado en carriles.

En el modelo de seguimiento vehicular, se toma en cuenta para el análisis la velocidad, la distancia segura, entre otros parámetros. Por otro lado, en el modelo de cambio de carril la necesidad de realizar este acto es la que impera. Esta necesidad se puede presentar por el deseo de adelantar un vehículo o por la forma de conducción del conductor. En el caso del comportamiento no basado en carriles, se basa en la posibilidad de adelantamiento vehicular en el mismo carril (PTV GROUP, 2016).

#### **2.4.6. Calibración del modelo**

La calibración es el proceso mediante el cual los parámetros del modelo de simulación que afectan el comportamiento de la red de flujo creada son ajustados hasta lograr una representación adecuada de las condiciones reales (Siddharth & Gitakrishnan, 2013). Algunos de los parámetros que pueden ser calibrados son: la longitud de las colas, tiempo de viaje, velocidad, etc. (Dowlig et al, 2004).

#### **2.4.7. Validación del modelo**

El modelo calibrado se evalúa con un conjunto nuevo de datos de campo, incluyendo en ellos los volúmenes de entrada, la composición del tráfico, y otros datos necesarios. Este proceso es conocido como validación del modelo. El modelo se dice que está validado si se obtienen valores similares entre el software Vissim y los resultados extraídos en campo (Siddharth & Gitakrishnan, 2013).

### **2.5. Modelos de seguimiento vehicular (car following)**

Los modelos de seguimiento vehicular se desarrollan a partir de la interacción que existe entre un vehículo que transita por delante de otro. En otras palabras, se refiere a un concepto que involucra a un móvil "líder" y a otro con el papel de "seguidor".

Con el fin de desarrollar esta teoría, se han creado diversos modelos que abarcan esta relación particular entre dos vehículos. Algunas de ellas son el modelo de la compañía estadounidense General Motors, el modelo de Gipps y el modelo de Wiedemann.

#### **2.5.1. Modelo de la General Motors**

El modelo de la General Motors está basado en un mecanismo conformado por estímulos, sensibilidad y la reacción del conductor del móvil seguidor. Los estímulos se representan como la diferencia relativa entre la velocidad de un vehículo y el que le sigue. La sensibilidad se entiende como la percepción o tiempo de reacción del vehículo que sigue y la reacción se interpreta como la aceleración o desaceleración, basada en la sensibilidad y los estímulos, por parte del conductor del vehículo que seguidor (Prócer, 2015). A continuación, se presenta una ilustración del modelo.

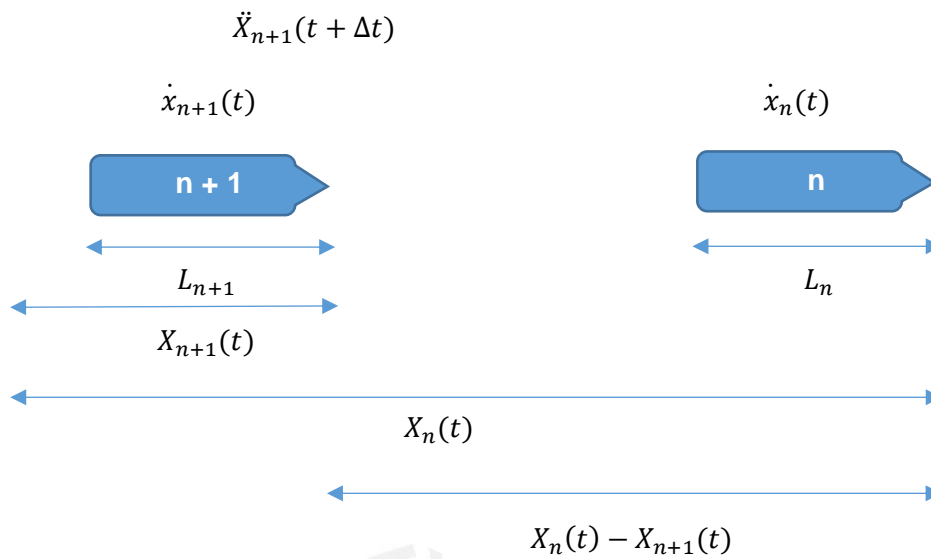


Figura 8. Seguimiento vehicular modelo General Motors

Fuente: Adaptado de Prócer (2015)

Donde:

n: Vehículo Líder

n+1: Vehículo seguidor

$L_n$ : Medida del vehículo líder (pies)

$L_{n+1}$ : Medida del vehículo seguidor (pies)

$X_n$ : Posición del vehículo líder (pies)

$X_{n+1}$ : Posición del vehículo seguidor (pies)

$\dot{X}_n$ : Velocidad del vehículo líder (pies/seg)

$\dot{X}_{n+1}$ : Velocidad del vehículo seguidor (pies/seg)

$\ddot{X}_{n+1}$ : Aceleración/desaceleración del vehículo seguidor (pies/seg<sup>2</sup>)

t: Variable que representa el tiempo

t+  $\Delta t$ : Variación del tiempo en la interacción

### 2.5.2. Modelo de Gipps

El modelo de Gipps sugiere que la velocidad de un vehículo está sujeta a tres limitaciones. En primer lugar, la velocidad del móvil no debe sobrepasar la velocidad deseada por el conductor. En segundo lugar, el vehículo acelera rápidamente hasta que se acerca a la velocidad deseada y luego la aceleración se reduce casi a cero. La tercera limitación es tomada en cuenta cuando la distancia entre los vehículos es corta y determina el comportamiento de marcha del vehículo siguiente, mientras que este último desacelera. Se da por entendido que el vehículo siguiente(n-1) ajustará su velocidad para mantener una distancia segura del vehículo precedente(n). Por otro lado, si dos vehículos se encuentran separados considerablemente, se comportan en condición de flujo libre (Papathanasopoulou & Antoniou, 2015). A continuación, se presentan ecuaciones representativas del modelo.

Ecuación 4

$$u_n(t + \tau) = \min\{u_n^a(t + \tau), u_n^b(t + \tau)\}$$

Donde:

$u_n^a$ : aceleración máxima que el conductor del vehículo "n" está dispuesto a desarrollar.

$u_n^b$ : es la desaceleración más brusca que el conductor del vehículo "n" desea emprender.

$u_n(t)$ : es la velocidad del vehículo n en el en el tiempo t.

$\tau$ : es el tiempo de reacción, que es constante para todos los vehículos e igual al paso de simulación.

Ecuación 5

$$u_n^b(t + \tau) = b_n \tau + \sqrt{b_n^2 \tau^2 - b_n \left[ 2[X_{n-1}(t) - S_{n-1} - X_n(t)] - u_n(t) \tau - \frac{u_{n-1} t^2}{\hat{b}} \right]}$$

Donde:

**$b_n$** : es la desaceleración más brusca que el conductor del vehículo "n" desea emprender.

**$\hat{b}$** : es la más severa desaceleración del vehículo n-1 según lo estimado por el conductor de vehículo n.

**$S_{n-1}$** : es el tamaño efectivo del vehículo n - 1. Esto incluye la longitud física de vehículo n - 1 y un margen de seguridad, en el que el conductor del vehículo n no está dispuesto a inmiscuirse incluso en reposo.

**$U_n$** : es la velocidad deseada del vehículo n.

**$X_n(t)$** : es la ubicación de la parte delantera del vehículo n en un instante t

**$U_n(t)$** : es la velocidad del vehículo n en el en el tiempo t.

**$\tau$** : es el tiempo de reacción, que es constante para todos los vehículos e igual al paso de simulación.

Ecuación 6

$$u_n^a(t + \tau) = u_n(t) + 2.5 a_n \tau \left( 1 - \frac{u_n(t)}{U_n} \right) \sqrt{0.0025 + \frac{u_n(t)}{U_n}}$$

Donde:

**$a_n$** : aceleración máxima que el conductor del vehículo "n" está dispuesto a desarrollar.

**$U_n$** : es la velocidad deseada del vehículo n.

**$U_n(t)$** : es la velocidad del vehículo n en el en el tiempo t.

**$\tau$** : es el tiempo de reacción, que es constante para todos los vehículos e igual al paso de simulación.

### 2.5.3. Modelo de Wiedemann

El modelo de Wiedemann se basa en la reacción y percepción de los conductores ante las distintas situaciones de tráfico. Cada conductor se relaciona con su propio vehículo, es decir, es modelado por separado. El modelo representa la percepción humana, sobre los vehículos, principalmente la percepción de distancias como también las diferencias de velocidad. Este modela como los conductores reaccionan a una situación específica cambiando su propio comportamiento de conducción. El modelo de Wiedemann se apoya en mediciones e investigaciones de la conducción humana (Arrieta, 2013). A continuación, se describen brevemente las situaciones (áreas) empleados por Wiedemann:

**Área de conducción libre:** El conductor busca adquirir y sostener cierta velocidad, es decir, su velocidad deseada individual. Además, no existe interacción entre vehículo líder y seguidor.

**Área de aproximación:** El conductor del móvil seguidor trata de adaptar su velocidad a la velocidad más baja del vehículo delantero. Se produce una desaceleración por parte del conductor seguidor de tal forma que la diferencia entre velocidades de los vehículos sea cero al alcanzar una distancia de seguridad deseada.

**Área de seguimiento:** El conductor escolta al vehículo antecesor sin ninguna muestra de aceleración o desaceleración perceptible. El piloto seguidor sostiene una distancia de seguridad deseada aproximadamente constante.

**Área de frenado o desaceleración:** Al aplicare una desaceleración considerable, se aprecia si la distancia cae por debajo de la distancia de seguridad deseada. Esto puede suceder si el vehículo que precede modifica su velocidad repentinamente o si un tercer vehículo cambia de carril en frente del conductor estudiado.

En la figura 9 se muestra las situaciones antes explicadas del modelo de Wiedemann.

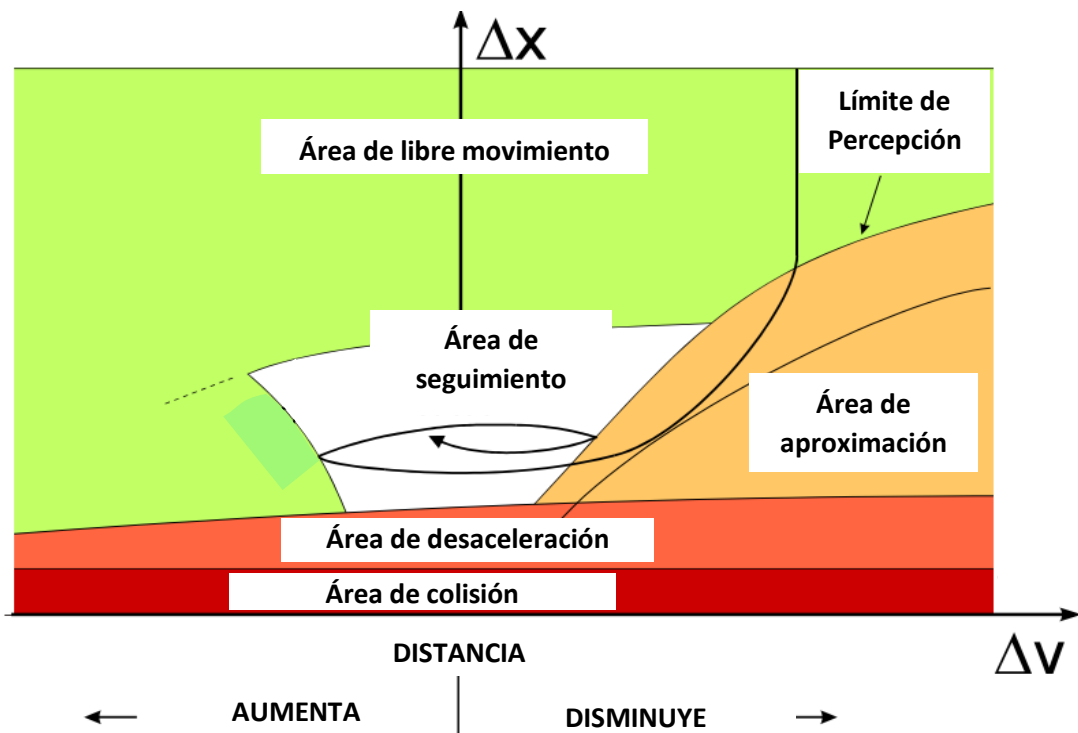


Figura 9. Fases del modelo de Wiedemann

Fuente: Adaptado de Manual de Vissim PTV América (2008)

## 2.6. Modelos de cambio de carril

En el caso de los Modelos de cambio de carril se realiza una clasificación que presenta por un lado a el cambio de carril cuando es necesario y, por otro lado, el cambio de carril cuando se desea realizar (libre).

### ➤ Cambio de carril necesario

Este modelo se presenta cuando el conductor de un vehículo necesita realizar un cambio de carril inevitable; ya que de no efectuarlo la ruta a seguir por el conductor se vería afectada. En el comportamiento del conductor, al momento que desea cambiar de carril, se muestra una desaceleración máxima aceptable para el vehículo que se encuentra en el carril (Suarez, 2007). En la figura 10 se exhibe un ejemplo de lo mencionado.



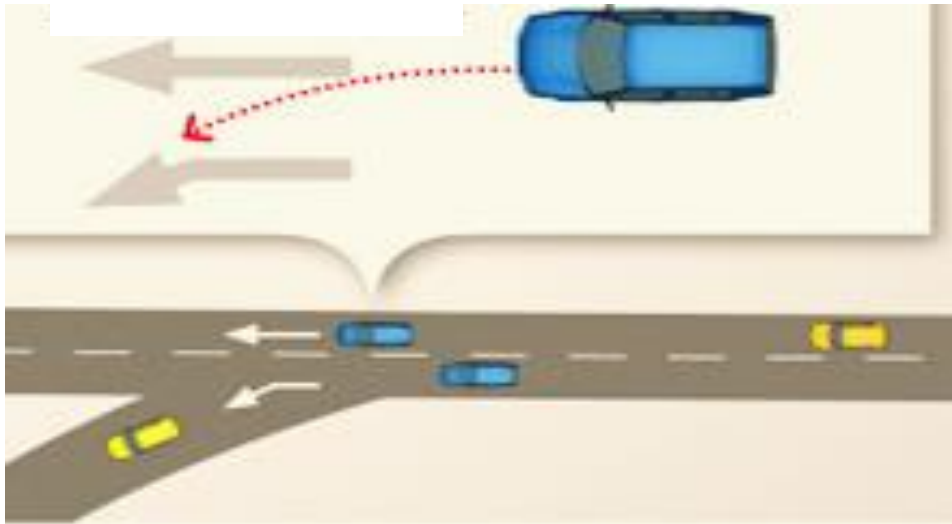


Figura 10. Cambio de carril necesario

Fuente: PTV GROUP (2016)

➤ **Cambio de carril libre**

El cambio de carril libre se presenta por parte de los vehículos a velocidades altas. El software Vissim se encarga de revisar la distancia de seguridad deseada por el conductor que quedará atrás en el carril nuevo. La distancia de seguridad dependerá de la velocidad de este vehículo y de la velocidad del vehículo que desea cambiar de carril (Suarez, 2007). En la figura 11 se muestra una circunstancia común de lo explicado.

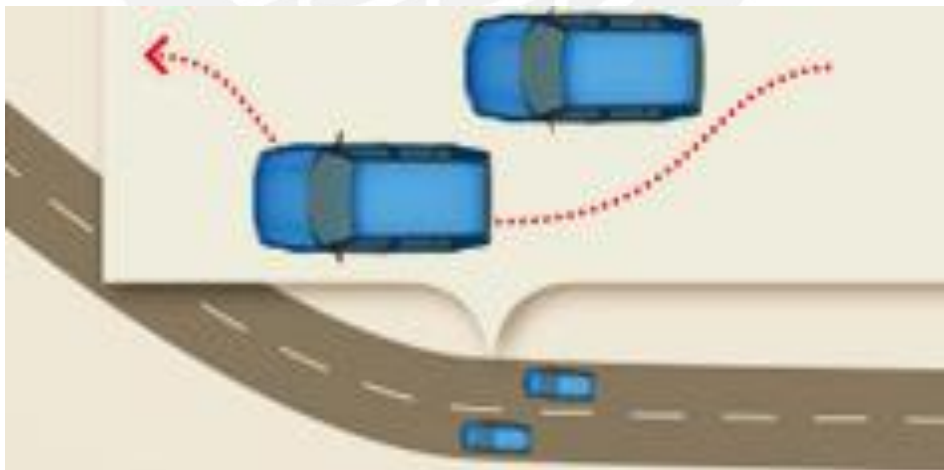


Figura 11. Cambio de carril libre

Fuente: PTV GROUP (2016)

## 2.7. Micro-simulación peatonal

La micro-simulación peatonal se describe generalmente como modelos computacionales que buscan representar acciones e interacciones de individuos autónomos. Estos modelos son una herramienta importante para evaluar la eficacia y seguridad de las instalaciones peatonales y espacios urbanos. En las últimas décadas, se han estado utilizando, cada vez con más frecuencia, softwares que permiten realizar esta micro-simulación. Uno de los más destacados es el programa Viswalk 8.0; ya que analiza el comportamiento peatonal basándose en el “*Social Force Model*” desarrollado por el profesor Helbing. Además, esta herramienta computacional permite la interacción del peatón con el transporte público y privado, otros peatones y la identificación de la ruta más rápida. (PTV GROUP, 2016).

### 2.7.1. Modelo de la Fuerza Social (Social Force Model)

El modelo de la Fuerza Social se basa en la suposición de que actúan distintos vectores de fuerzas sobre los peatones y todas estas en conjunto resultan en una única Fuerza Social resultante que describe la motivación de moverse de los peatones. Este modelo se desarrolló en la Universidad de Stuttgart por Helbing y Molnar en 1995. La Fuerza Social resultante se compone de 4 vectores fuerza que son los siguientes: La fuerza “*driving*” (lleva al peatón a su destino), la fuerza social (repulsión contra otros peatones), la fuerza “*wall*” (repulsión contra obstáculos del camino) y la fuerza “*noise*” (componente estocástica). A continuación, se presentan la Ecuación de la Fuerza Social Resultante (Ecuación 7) y una representación del modelo (figura 12).

Ecuación 7

$$\bar{F} = \bar{F}driving + \bar{F}social + \bar{F}wall + \bar{F}noise$$

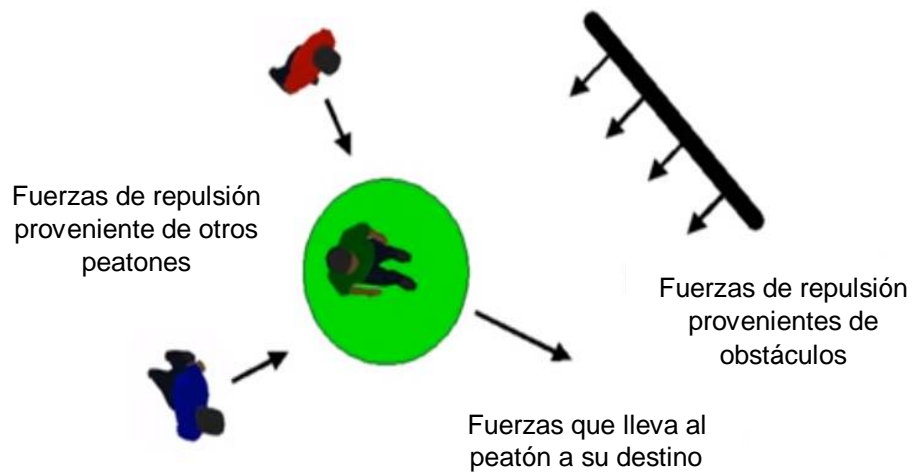


Figura 12. Modelo de la Fuerza Social

Fuente: Adaptado de PTV GROUP (2016)

Este modelo se validó mediante análisis de velocidad y densidad. La conclusión de este estudio reveló que a mayor densidad de peatones menor sería la velocidad de desplazamiento de los mismos en el mismo espacio. En adición a este análisis, se experimentó con la representación de fenómenos de auto-organización. Los resultados de estos ensayos mostraron que los peatones prefieren seguir a la persona que tienen delante en una situación de aglomeración de peatonal; ya que de esta manera reducen las fuerzas de repulsión de las personas que circulan en sentido opuesto a los peatones estudiados (PTV GROUP, 2016).

## **CAPÍTULO 3. VISSIM Y VISWALK SOFTWARE DE MICRO-SIMULACIÓN**

### **3.1. Vissim**

El software Vissim es una herramienta de simulación empleada para el diseño de sistemas de control de tráfico. Este programa es una parte de PTV Vision Traffic Suite, que también incluye Visum, una herramienta de simulación macroscópica. Vissim es una herramienta que permite la simulación microscópica; ya que emplea un modelo que se centra en cada vehículo como una entidad particular. Lo cual posibilita su aplicación para distintos proyectos de análisis de tráfico como intersecciones, rotondas, etc. Además, este programa es capaz de trabajar con una gran variedad de móviles tales como autos, camionetas, motos, bicicletas, camiones, etc. (Papageorgiou, 2006).

### **3.2. Antecedentes de Vissim**

Vissim es una herramienta de simulación microscópica y multimodal del tránsito, fue desarrollada por PTV (Planung Transport Verkehr) en Karlsruhe, Alemania. El nombre del programa es un acrónimo que deriva del alemán “Verkehr In Städten - SIMulation”. Lo cual se traduce como simulación del tránsito en las ciudades. El software Vissim se desarrolló a inicios de los años 70 en la Universidad de Karlsruhe en Alemania; para el año 1973 se comienza la comercialización y distribución por parte de PTV América Inc. En el año 1995 se emplea en Estados Unidos por primera vez en Eugene, Oregon (Suarez, 2007). Actualmente, se cuenta con la versión 8.0 del programa. Esta última versión será la empleada en el desarrollo de este proyecto.

### **3.3. Funcionamiento del software Vissim**

El programa Vissim es un modelo computacional que se basa en los parámetros del seguimiento vehicular, psicofísicos, formulados por Wiedemann. La arquitectura del sistema de Vissim consta de dos programas separados, el modelo de flujo de tráfico y el modelo de control de señales (Papageorgiou, 2006), como se muestra en la Figura 13.

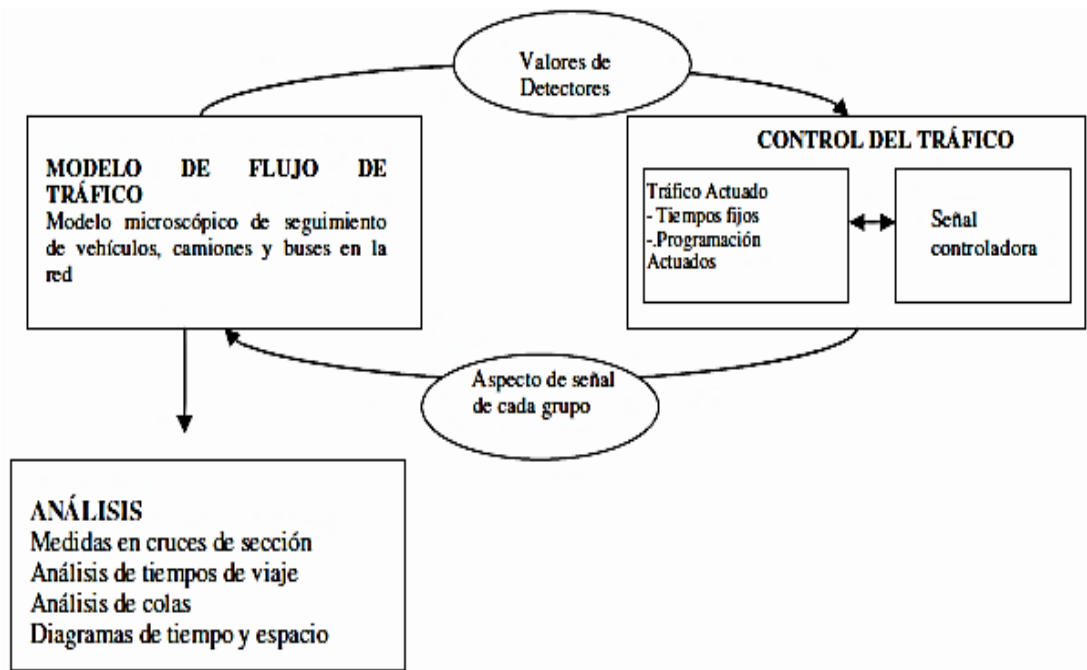


Figura 13. La arquitectura del sistema de Vissim

Fuente: Adaptado de PTV American (2006)

La animación de la circulación de los vehículos es posibilitada por el modelo de flujo de tráfico. Por otro lado, el modelo de control de señal permite la generación de archivos de salida con acumulación de datos estadísticos como son las longitudes de cola y tiempos de viaje (Bloomberg, 2000).

Las principales áreas de aplicación de Vissim son estudios prioritarios de señales de tránsito, y el diseño de intersecciones y operaciones de tráfico (Boxill & Yu, 2000). El funcionamiento del software Vissim está ligado al conjunto integrado por el modelo de seguimiento vehicular, de mayor impacto sobre Vissim, y el modelo de cambio de carril. En el primer modelo, se ajustará la separación entre vehículos cuando un vehículo con mayor velocidad se aproxime a uno más lento. La forma de actuar del conductor se involucra en esta regulación de la separación entre vehículos; ya que dependerá de la velocidad con la que transita y de la diferencia de distancia entre vehículos. El segundo modelo se verá influenciado por la necesidad del cambio de dirección o ruta de los vehículos (Ahmed, 1999).

### **3.4. Componente estático**

La infraestructura aplicable a la red de tráfico es ilustrada por estos componentes. Los links y conectores son ejemplos de este tipo de elementos. Los primeros se componen de rutas o carreteras direccionadas con un número determinado de carriles. Por otro lado, los conectores son el medio por el cual se unen los links. Estos permiten los giros y movimientos en el caso de las intersecciones y rotondas que se desee modelar (PTV GROUP, 2016). Igualmente, existen otros componentes estáticos como las señales de tránsito. Estas se usan como medio informativo para el cumplimiento de las normas establecidas.

### **3.5. Componente dinámico**

Un ejemplo de estos elementos son los semáforos; ya que influyen en el comportamiento de los conductores. Esto repercute considerablemente en el sistema; ya que el nivel de detalle que se requiere en un modelo de simulación microscópico está en relación directa con la exactitud de este tipo de componentes. Además, estos componentes cambian con el transcurso del tiempo en la circulación del tráfico (Narváez & Zapardiel, 2015).

### **3.6. Infraestructura del modelo**

La construcción de un modelo de micro-simulación en el software computacional Vissim depende del fin del análisis que se quiera llevar a cabo. Por ejemplo, si se requiere evaluar una señal lógica de activación del tránsito en una intersección bastará con un esbozo de la misma. Por otro lado, si se desea efectuar un análisis de operaciones de tráfico y evaluar su comportamiento será necesario un modelado detallado de la zona de estudio. El mismo que se deberá trabajar a escala y mediante una metodología establecida con el fin de obtener los resultados buscados. Entre las herramientas que se recomiendan para la recolección de datos están: mediciones en planos CAD, fotografías satelitales, mediciones en campo, etc. (Fellendorf & Vortisch, 2010).

#### **3.6.1 Link y conectores**

La red vial está conformada por links y conectores, y son de vital importancia en la construcción de la infraestructura del modelo; ya que estos son la base para la representación del sistema de tráfico que se desea trabajar, en este caso una intersección. Existen algunas situaciones en las cuales es indispensable el uso de estos elementos. La primera de ellas se presenta cuando se necesita realizar un cruce en el modelo. Para lograr este objetivo se requiere emplear tanto links como

conectores para crear la unión que se necesita. Otra posible situación en la que es indispensable el uso de ambos se presenta cuando un link es dividido en dos o más bifurcaciones en el seguimiento de su recorrido y se desea fusionarlos (un conector cumplirá con esta tarea). Otra posible circunstancia, se lleva a cabo cuando en la ruta existen cambios en el número de carriles o el ancho de las vías. Usualmente, los nodos localizados en secciones interrelacionadas y links instalados a lo largo de los tramos viales representan un diseño vial (Fellendorf &Vortisch, 2010).

En la figura 14 se ilustra un conjunto de conectores y links que forman un modelo de una rotonda en construcción.

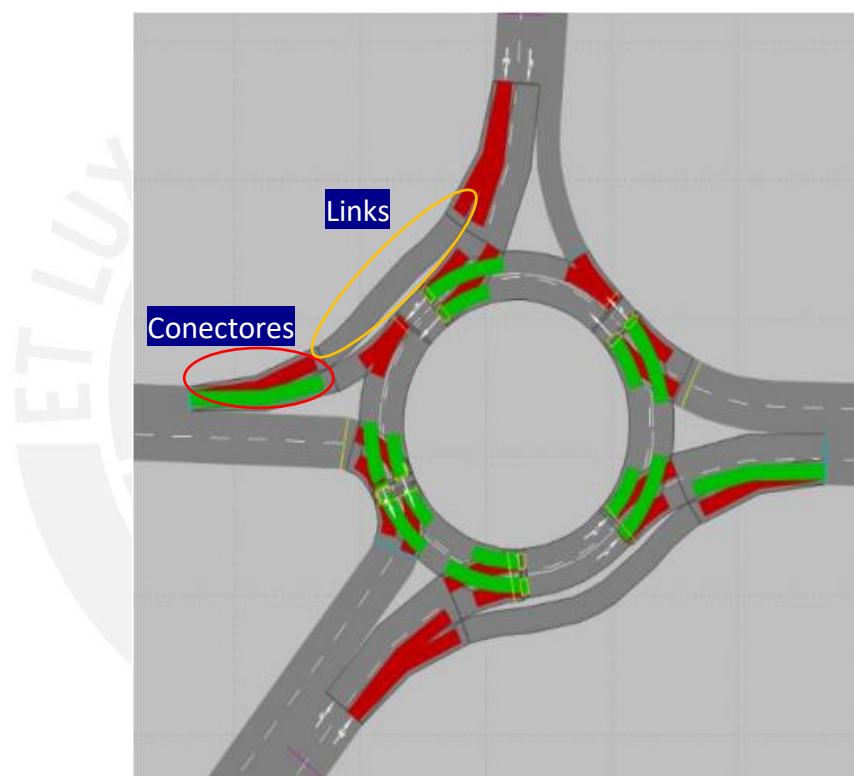


Figura 14. Modelo de rotonda en construcción

Fuente: Adaptado de PTV GROUP (2016)

### 3.6.2 Otros elementos del modelo

En el software Vissim existen otros comandos para incrementar el nivel de detalle de modelo en construcción si se requiriese. A continuación, se mencionará algunos de ellos.

Primeramente, se tiene la opción de crear áreas de reducción de velocidad. Estas pueden ser empleadas en los giros de los vehículos, logrando así mayor similitud entre el modelo y la realidad.

Otro elemento a destacar es la prioridad en los usuarios; ya que de esta dependerá la interrelación entre los mismos. Por lo que, se debe realizar la identificación de los vehículos con mayor preferencia a comparación de otros. Esta prioridad se ve reflejada, por ejemplo, en un óvalo en el que la preferencia la tienen los conductores que transitan por el mismo respecto a los que se ubican en las calles que se conectan con el óvalo.

Otro componente importante es la representación de los semáforos en el modelo. Estos son llevados de la realidad al modelo virtual a través de los denominados “*signal head*”.

### **3.7. Control del tráfico**

El control del tráfico se puede lograr mediante una simulación microscópica de la zona de estudio. Una de las herramientas computacionales que se emplean con este fin es el software Vissim. El mismo que se utilizará en el desarrollo de este trabajo. Este programa que se basa en un modelo estocástico ayuda al análisis de sistemas de tráfico como rotondas, intersecciones, etc. Estos últimos sistemas mencionados pueden ser de dos tipos: intersecciones controladas por semáforos e intersecciones no semaforizadas.

#### **3.7.1 Intersecciones no semaforizadas**

En esta clase de intersección priman las reglas de prioridad entre conectores y vías por donde transitan los vehículos. Estas se aplican a todas las situaciones en las que los vehículos participan. Algunos ejemplos de modelamiento en los cuales se aplican las reglas de prioridad son:

- Intersecciones no controladas donde el tráfico tiene que dar paso al tráfico de la derecha.
- Intersecciones no controladas donde el tráfico en la carretera que concluye debe dar paso al tráfico en la carretera que continúa.
- Las rotondas donde los vehículos que entran en las rotondas tienen que dar paso al tráfico dentro de la rotonda.
- La fusión de las zonas donde el tráfico que entra desde una rampa tiene que ceder en el tráfico de la ruta principal.



En la figura 15 se aprecia una aplicación de reglas de prioridad, donde el vehículo 1 cuenta con la preferencia; ya que se encuentra transitando por una vía principal. Por lo que, el vehículo 2 se debe mantener en espera en la línea de parada hasta que el vehículo 1 haya pasado la zona de conflicto (Fellendorf &Vortisch, 2010).

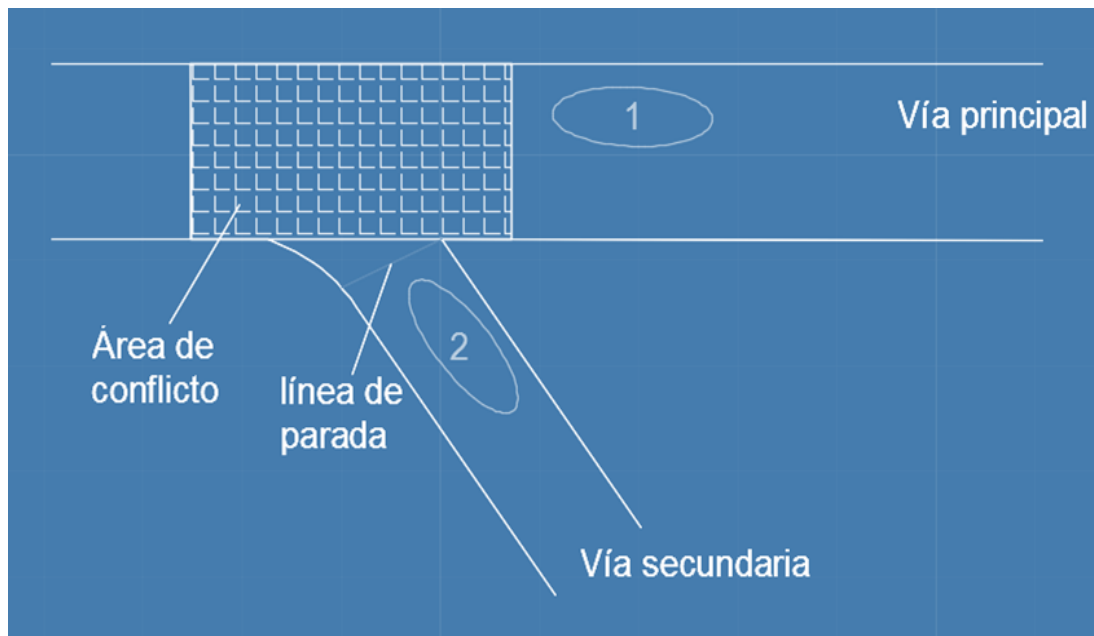


Figura 15. Concepto de modelación con reglas de prioridad.

Fuente: Adaptado de Fellendorf &Vortisch (2010)

### 3.7.2 Intersecciones semaforizadas

A diferencia de las intersecciones no controladas por semáforos, en las intersecciones semaforizadas rigen los denominados “*signal control*”, que se emplean en el control del funcionamiento de tránsito de la intersección.

Los semáforos poseen fases que se representan, normalmente, por los colores rojo, amarillo y verde. En el modelo, estas características de los semáforos se ingresan a través del uso de grupos de señales. Los semáforos se reconocen en un modelo de simulación microscópica gracias a los llamados “*signal head*”. Estos se colocan en la construcción modelo en los cruces o lugares donde se desee un control semaforizado (Fellendorf &Vortisch, 2010).

A continuación, en la figura 16, se presenta una ilustración del modelamiento de una intersección semaforizada urbana.

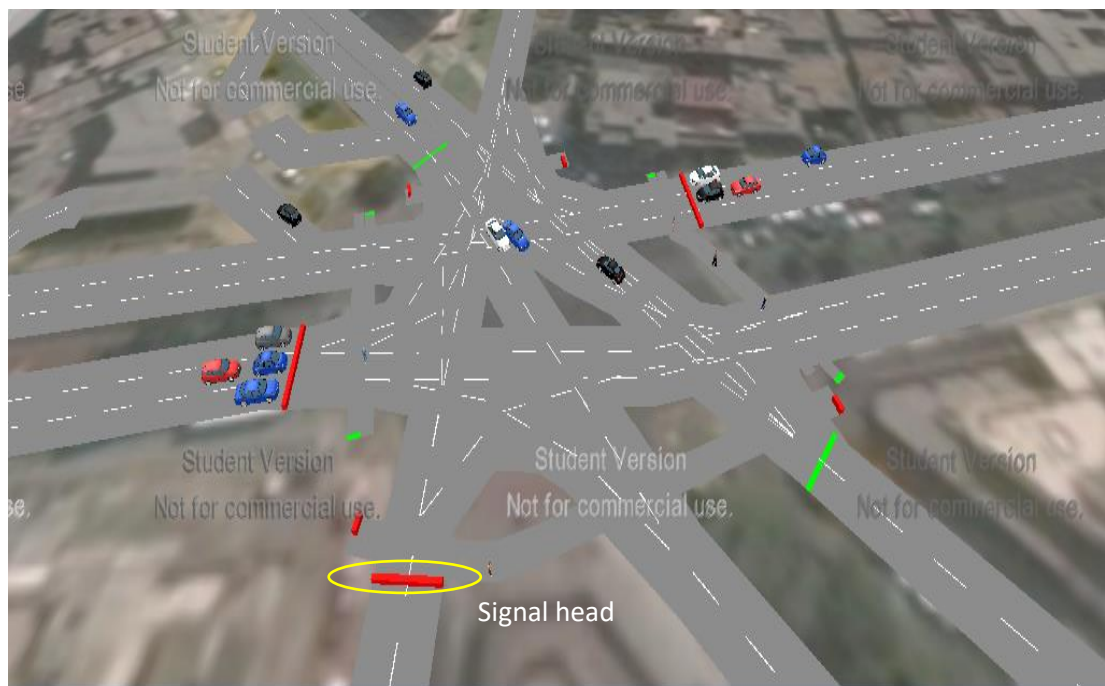


Figura 16. Intersección semaforizada

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8 Viswalk

El software Viswalk se desarrolló con el fin de obtener una representación de la realidad de los usuarios de a pie para poder analizar su comportamiento. Viswalk se puede emplear en paralelo con Vissim, pero también se puede utilizar solo en el caso de que se desee analizar únicamente peatones.

El deseo de moverse o llegar a su destino se considera como el impulso principal para desplazarse en los peatones. Por otro lado, existen otros factores que afectan la velocidad y el camino que siguen los peatones para alcanzar su destino. Estos pueden ser obstáculos (personas u objetos) o una menor distancia a recorrer para llegar a un mismo lugar.

### 3.8. Consideración del modelo

En el modelo que se construirá con ayuda de las herramientas computacionales Vissim 8.0 y Viswalk 8.0, se tendrá en cuenta los fundamentos de la micro-simulación descritos hasta este punto del proyecto. Además, se considerará los modelos de seguimiento vehicular y cambio de carril con los que trabajan en conjunto los softwares en cuestión. Por otro lado, el programa Vissim es capaz de representar la forma de actuar de los conductores ante situaciones específicas en el desarrollo del flujo vehicular. En adición a lo expresado, se puede mencionar que la distancia de seguridad que existe entre dos vehículos, para su interacción, se puede calcular empleando la ecuación 8, en la cual intervienen los parámetros del modelo de Wiedemann 74 que se empleará en el análisis de la zona de estudio. En el caso de Viswalk, se cuenta con una característica única denominada "Dynamic Potential" (Potencial dinámico) que permite a los peatones revisar las condiciones actuales para elegir la ruta más rápida, no la más corta necesariamente (PTV GROUP, 2016).

<p>Ecuación 8</p> $d = ax + (bx_{add} + bx_{mul} * z)x\sqrt{v}$	<p>Donde:</p> <p><b>ax:</b> distancia promedio deseada entre vehículos detenidos.</p> <p><b>bx_add:</b> parte aditiva de la distancia deseada por seguridad</p> <p><b>bx_mult:</b> parte multiplicativa de la distancia deseada por seguridad</p> <p><b>Z:</b> valor entre 0 y 1, obtenido de una distribución normal (<math>\mu = 0.5</math> y <math>\sigma = 0.15</math>)</p> <p><b>V:</b> velocidad (m/s)</p>
---	--

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA, RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

### 4.1. Metodología

La metodología con la que se llevará a cabo este proyecto de ingeniería tendrá como base los lineamientos sugeridos por la FHWA (2004). Los cuales se desarrollan a continuación.

En primer lugar, se ubica los alcances y limitaciones del proyecto. Los cuales contemplarán los objetivos del trabajo, la definición de la ubicación y zona de estudio y la selección del tipo de modelo a emplear según el nivel de detalle del análisis. En este proyecto, la zona de estudio es una intersección localizada en la ciudad del Cusco.

Luego, se procederá con la recolección y procesamiento de datos. En este apartado se seleccionará el equipo de trabajo para el registro de los datos de campo, así como la fecha de estudio. Con el fin de obtener los datos necesarios se emplean instrumentos tales como una cinta métrica, una filmadora, entre otros. La recolección de datos, en la zona de interés, se llevó a cabo el día 18 de Julio del 2016 por un intervalo de tiempo dos horas (7:15 a.m.-9:15 a.m.) con la ayuda de 1 persona. El registro de la información obtenida de campo se incluirá como parte de los datos de entrada para los softwares que se emplearán.

Estos dos primeros incisos forman parte del trabajo previo que se debe realizar para el desarrollo del modelo microscópico necesario.

A continuación, se realizará el desarrollo de la micro-simulación mediante los softwares Vissim 8.0 y Viswalk 8.0. En los cuales se emplearán los registros de los datos de campo con el fin de construir el modelo de la intersección a estudiar. Una vez concluido el modelo, se ejecutará la verificación del mismo a través de la revisión de los datos de entrada (aforos vehiculares, aforos peatonales, velocidad de viaje, entre otros). Estos dos ítems conforman el desarrollo de la situación actual de la zona de estudio.

Seguidamente, se procederá con la calibración del modelo. Aquí se ajustarán los resultados logrados en campo y Vissim, según el parámetro de eficiencia elegido. Con este fin, se tomará en cuenta un nivel de confianza del 95% y en caso de porcentaje de error se admitirá el 10%. En cuanto al parámetro utilizado para la calibración se eligió el tiempo de viaje, en un tramo, de los vehículos en la Avenida San Martín (Sur).

Luego, se llevará a cabo la validación del modelo mediante la evaluación del mismo con datos distintos a los empleados como datos de entrada. Asimismo, se verificará que el modelo obtenga resultados semejantes a los de campo.

Finalmente, se elaborará el análisis y documentación del proyecto. En cuanto al análisis, se contemplará la evaluación de los resultados obtenidos de la micro-simulación con el fin de proponer mejoras para la situación presente del proyecto. En la documentación del trabajo, se recogerá toda la información y se presentará propuestas de mejora. Además, se incluirán las conclusiones y recomendaciones que se obtendrán del estudio realizado del proyecto.

En la siguiente figura presentada se observa un esquema de la metodología a seguir.



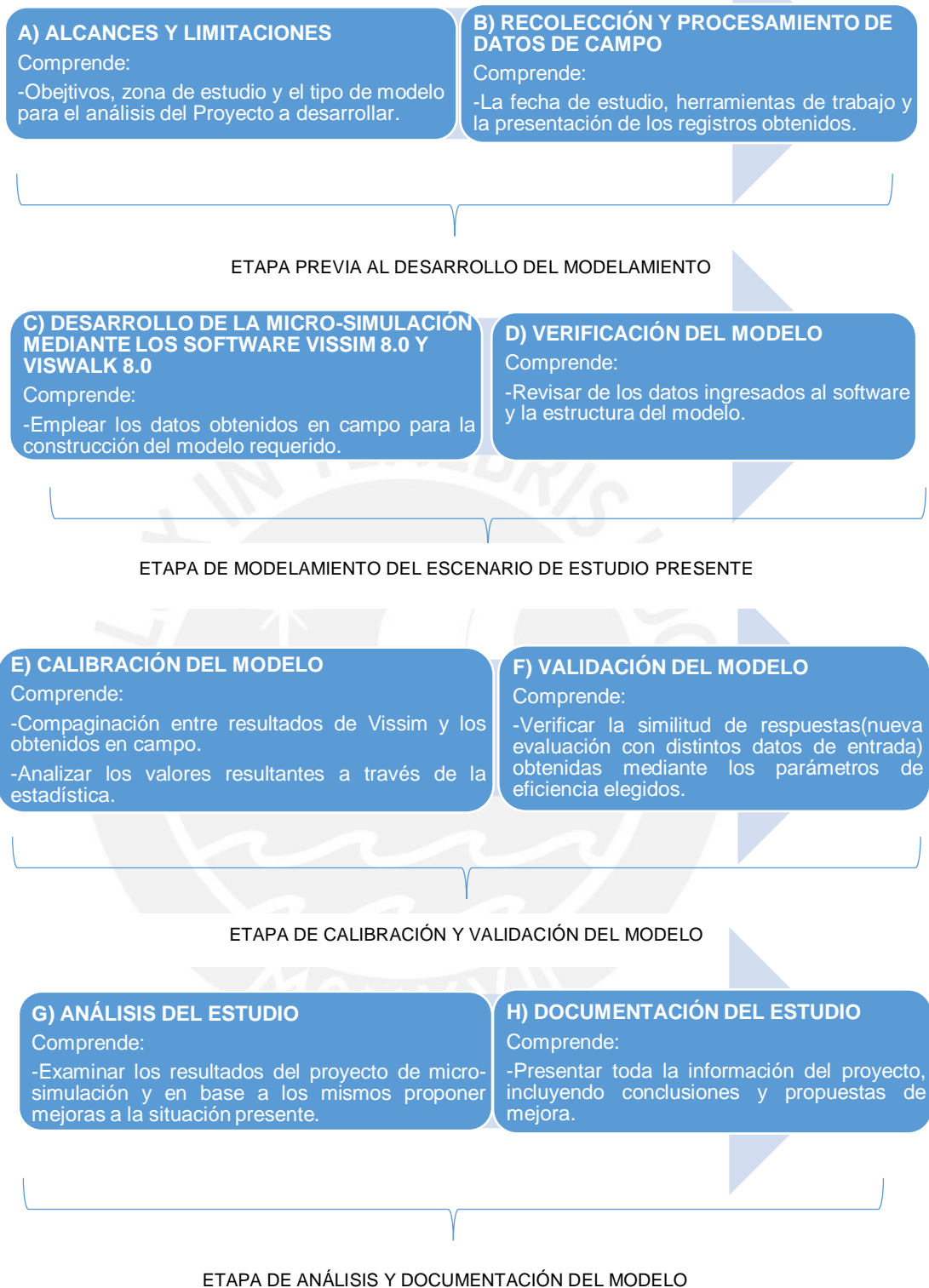


Figura 17. Metodología propuesta para el desarrollo del estudio.

Fuente: Adaptado de FHWA (2004)

## **4.2. RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO**

Se realizó la recolección de datos de campo de acuerdo a la metodología expuesta en el presente proyecto de ingeniería. A continuación, se explicará los detalles adicionales que se tomaron en cuenta.

### **4.2.1 Elección de la intersección de análisis**

El autor de esta tesis al haber cursado la asignatura de “Gestión de tránsito” en la PUCP, tenía conocimientos y experiencia en la toma de datos de una zona de estudio; ya que se recolectó datos de la intersección de las avenidas Bolívar, Córdova y calle Andalucía en la materia mencionada. Se contaba con 4 opciones para el desarrollo de este proyecto. Todas ellas intersecciones ubicadas en la ciudad del Cusco. Las cuales eran: la intersección de calle Mantas con avenida El Sol, La intersección de avenida El Sol con calle Almagro, la intersección de avenida de la Cultura con las calles Víctor Raúl Haya de la Torre y hermanos Ayar y la intersección de las avenidas El Sol, Tullumayo, San Martín y calle Regional. Para proceder a la selección de una de las alternativas, se realizó una evaluación de factibilidad y accesibilidad. Esto contemplaba la geometría de la zona, el aforo peatonal, el aforo vehicular, la posibilidad de grabación, entre otros. Por ejemplo, en el caso de la intersección de calle Mantas con avenida El Sol, no se podía realizar ningún cambio a la geometría del lugar al estar protegida por ser patrimonio cultural. Lo mismo ocurría con la intersección de avenida El Sol con calle Almagro. Por otro lado, en cuanto a la intersección de avenida de la Cultura con las calles Víctor Raúl Haya de la Torre y hermanos Ayar, no presentaba las facilidades para la recolección de datos. Esto debido a que, en la ubicación de esta intersección no existe una zona elevada (hoteles) que permitan la toma óptima de datos de campo. Esta recolección es de vital importancia para el estudio desarrollado. Por lo tanto, luego de efectuar el análisis necesario, se optó por la intersección de las avenidas El Sol, Tullumayo, San Martín y calle Regional; ya que en esta zona brinda facilidades para la grabación, se permite la modificación de la geometría de la misma y está ubicada en una zona céntrica de la ciudad, donde existen locales comerciales, hoteles y colegios a pocas cuadras de la intersección. Cabe recalcar que todas las intersecciones propuestas padecen con problemas de tránsito vehicular y peatonal, siendo una de las más críticas la seleccionada para este proyecto.

En la siguiente figura, se muestra una vista satelital de la zona de estudio adaptada de Google Maps.

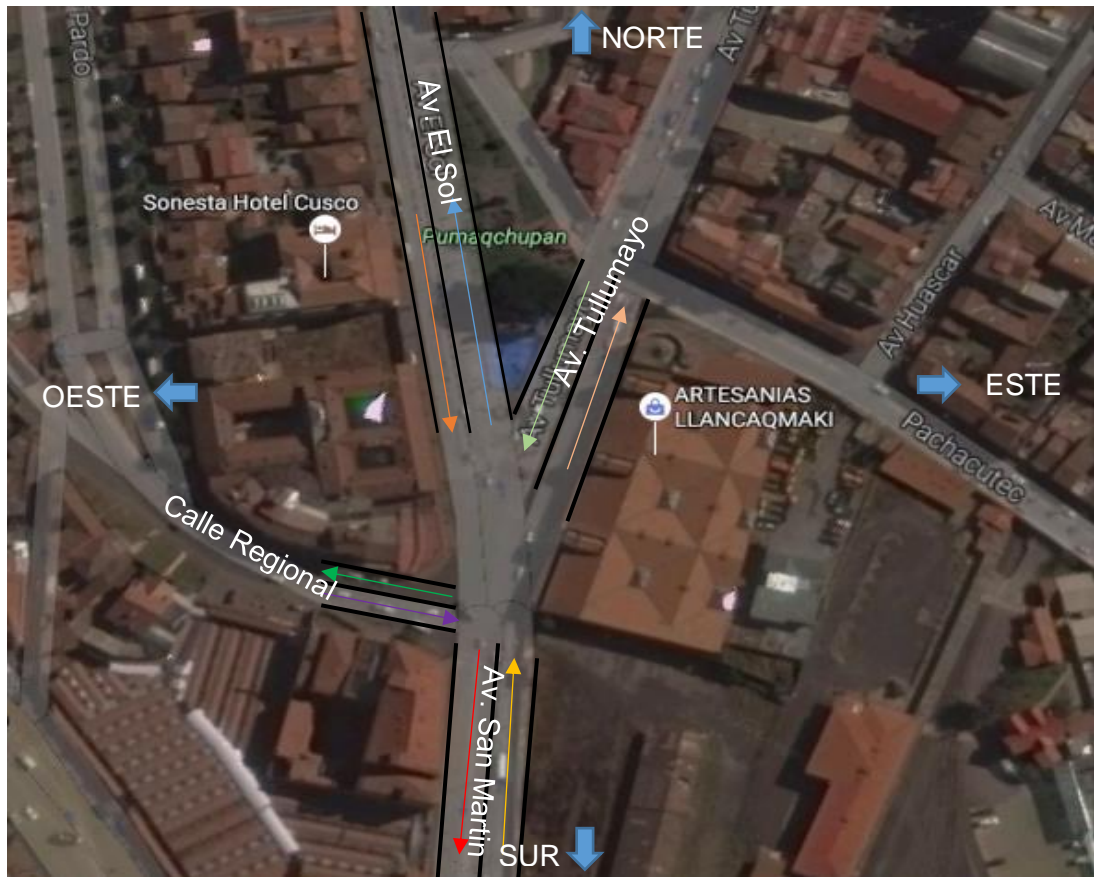


Figura 18. Vista satelital de la zona de estudio

Fuente: Adaptado de Google Maps (2016)

#### 4.2.2 Elección del equipo de trabajo y registro de datos de campo

El equipo de trabajo se seleccionó de acuerdo a la experiencia del autor en la toma de datos de esta índole según la materia cursada en la PUCP, siendo necesarios una filmadora, una cinta métrica, un cuaderno de apuntes, entre otros. Las actividades comprendidas en el registro de datos de campo fueron: los aforos peatonales, aforos vehiculares, la videograbación, listas de chequeo, tiempo de los semáforos y la geometría de la zona de estudio. Con el fin de facilitar la toma de datos, se usó una segunda filmadora en la cual se grabó detalles de las longitudes de cola y aforo peatonal. A continuación, se explicará en mayor detalle cómo se realizaron las actividades mencionadas.



### 4.2.3 Recolección de datos de campo

La recolección de datos de campo se efectuó el día lunes 18 de Julio del 2016 por un intervalo de tiempo dos horas (7:15 a.m.-9:15 a.m.) en este lapso de tiempo se realizaron las actividades necesarias con la ayuda de 1 persona. Estas actividades se describirán seguidamente.

#### ➤ Videograbación

La videograbación es una de las principales actividades en el caso del proyecto a desarrollar; ya que dependerá de la calidad de la toma de datos que el modelo a construirse refleje de mejor o peor forma la situación actual de la zona de estudio. Lo cual repercutirá en los análisis y resultados posteriores. Esta videograbación contiene las longitudes de cola, el comportamiento de los usuarios en la intersección, entre otros detalles importantes para la construcción del modelo.

En primer lugar, se realizó la recolección de datos para la calibración del modelo y posteriormente se hizo nuevamente para la validación del mismo. La cámara que se empleó fue la del celular inteligente Samsung Galaxy S7 Edge. La filmación se realizó por el periodo de dos horas. Una hora para la calibración del modelo y la otra hora para la validación del mismo. Adicionalmente, se utilizó una filmadora Sony Handycam Vision con la finalidad de capturar más detalles. En las siguientes figuras se muestra el equipo usado.



Figura 19. Samsung Galaxy S7 Edge

Fuente: Adaptado de Gsmarena (2016)



Figura 20. Sony Handycam Vision

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, cabe señalar que la captura de video se desarrolló desde el 3er piso de un hotel ubicado cerca al cruce de la avenida El Sol con la calle Regional; ya que se observó un mejor panorama para la filmación desde este punto.

### ➤ Longitud de cola

Para la toma de datos de este parámetro se asignó un número a cada longitud de cola en las vías correspondientes. El orden de la numeración se basó en la cantidad de vehículos que circulan por las mismas, donde 1 significa el mayor número de automóviles y 4 el menor. Con el fin de facilitar la medición de las longitudes se referencio la distancia a postes, paneles publicitarios y paraderos en la zona de estudio. A continuación, se aprecia el orden dado a las vías, para la medición del parámetro descrito, en la figura 21.



Figura 21. Organización de longitudes de cola

Fuente: Adaptado de Google Maps (2016)

### ➤ Aforo vehicular

En el caso del aforo vehicular se efectuó el conteo directamente de la grabación realizada de la intersección de estudio. Para la contabilización de los vehículos, se tomaron intervalos de 15 minutos por cada hora de filmación según las

recomendaciones brindadas en el curso de “Gestión de tránsito”. El registro de datos se llevará a cabo bajo el formato que se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de registro de aforo vehicular

	<b>CANTIDAD DE VEHÍCULOS</b>				
<b>Hora</b>	<b>Autos</b>	<b>Buses</b>	<b>Combi</b>	<b>Motos</b>	<b>Camiones</b>
<b>7:15 a 7:30</b>					
<b>7:30 a 7:45</b>					
<b>7:45 a 8:00</b>					
<b>8:00 a 8:15</b>					
<b>TOTAL</b>					

Fuente: Elaboración propia

➤ **Aforo peatonal**

El aforo peatonal se recolectó de la misma manera que el aforo vehicular. El formato que se empleó es el que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla de registro de aforo peatonal

	<b>CANTIDAD DE PERSONAS</b>			
<b>Hora</b>	<b>Adulto varon</b>	<b>Adulto mujer</b>	<b>niño</b>	<b>niña</b>
<b>7:15 a 7:30</b>				
<b>7:30 a 7:45</b>				
<b>7:45 a 8:00</b>				
<b>8:00 a 8:15</b>				
<b>TOTAL</b>				

Fuente: Elaboración propia

### ➤ **Tiempo de semáforos**

Esta actividad se realizó con la ayuda de un cronómetro. Por otro lado, se identificó que existen semáforos peatonales en adición a los vehiculares en la zona de estudio. Los cuales también se contabilizaron. A continuación, se muestra la ubicación de los semáforos en la figura 22.

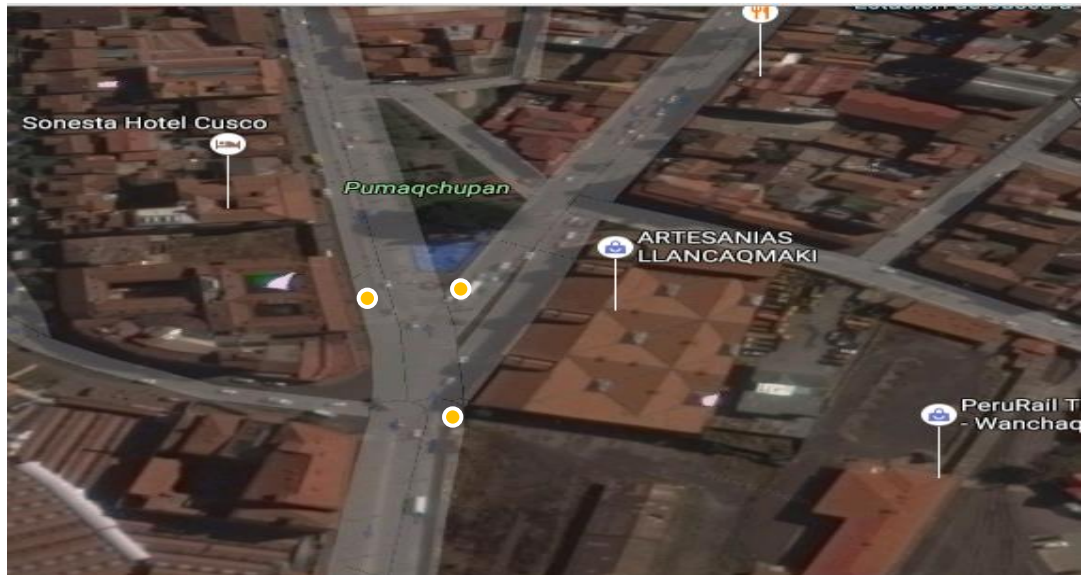


Figura 22. Ubicación de los semáforos

Fuente: Adaptado de Google Maps (2016)

### ➤ **Geometría del sistema**

La geometría del sistema se registró con ayuda de una persona. Se empleó una cinta métrica y un cuaderno de apuntes para medir las dimensiones pertinentes como: el ancho de los carriles, la longitud de las rampas, longitudes de las veredas, el ancho de las islas, entre otros elementos importantes de la zona de estudio.

### ➤ **Lista de chequeos**

Por último, la lista de chequeos en la cual se examina la situación actual de la zona de estudio contempla: el estado de las pistas, la existencia de las señalizaciones necesarias, la ocurrencia de accidentes en la zona, entre otros aspectos importantes de la intersección. Esta actividad se basa en revisar la intersección y levantar observaciones dependiendo de las condiciones de la misma. La totalidad de la información recolectada será procesada para ser utilizada posteriormente para proponer mejoras a la intersección.

### 4.3. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO

A continuación, se presentará el procesamiento de los datos registrados.

#### ➤ Videograbación

La filmación se efectuó desde el tercer piso de un hotel ubicado en la Av. El Sol. En la siguiente imagen se aprecia la ubicación del punto de grabación.



Figura 23. Ubicación del equipo de filmación

Fuente: Adaptado de Google Maps (2016)

Con el fin de obtener mayores detalles (puntos ciegos de la primera filmadora) de la intersección se empleó una segunda filmadora. Esta última se usó a nivel del piso a lo largo de toda la zona de estudio.

➤ **Longitud de cola**

Las longitudes de cola se obtuvieron usando la segunda filmadora a nivel del piso y mediante referencias de distancias medidas en las avenidas con ayuda de una persona. Estas medidas se realizaron en el momento que cada semáforo cambiaba de rojo a verde (fases). En la siguiente tabla se muestran los datos recolectados.

Tabla 3. Longitudes de cola

Recolección	Longitud de cola 1	Longitud de cola 2	Longitud de cola 3	Longitud de cola 4
1	37.100	17.800	5.800	0.000
2	43.300	41.500	4.700	0.000
3	57.900	22.400	7.400	6.400
4	53.900	46.500	13.400	7.500
5	55.900	50.400	12.500	0.000
6	59.800	50.500	6.700	7.800
7	52.900	74.400	8.500	15.800
8	116.500	30.200	23.300	15.500
9	131.600	74.400	48.800	20.300
10	86.900	74.400	35.800	7.800
11	90.800	46.500	23.800	5.800
12	41.000	74.400	23.300	6.700
13	86.900	50.500	6.700	6.400
14	55.900	31.600	7.400	3.500
15	12.700	12.400	8.500	4.800
16	15.100	46.500	35.800	7.800
17	55.900	25.400	51.800	6.400
18	37.100	8.800	14.000	5.800
19	11.500	7.000	3.500	3.500
20	55.900	66.400	23.300	0.000
21	59.400	40.500	32.800	0.000
22	37.100	74.400	12.500	3.500
23	15.100	14.400	36.500	0.000
24	34.100	38.500	3.500	3.500
25	55.900	40.500	0.000	0.000
26	40.600	25.400	0.000	7.000
27	37.100	66.400	12.500	3.500
28	33.600	66.400	7.000	0.000
29	44.100	69.900	14.000	4.800
30	60.700	62.900	65.900	7.800
31	37.100	66.400	36.500	7.000
<b>Promedio</b>	<b>52.045</b>	<b>45.732</b>	<b>18.910</b>	<b>5.448</b>
<b>Máximo valor</b>	<b>131.600</b>	<b>74.400</b>	<b>65.900</b>	<b>20.300</b>
<b>Mínimo valor</b>	<b>11.500</b>	<b>7.000</b>	<b>0.000</b>	<b>0.000</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>27.574</b>	<b>21.939</b>	<b>16.668</b>	<b>4.905</b>

Fuente: Elaboración propia

➤ **Aforo vehicular**

Se presentará la cantidad de vehículos que se distribuyen en las diferentes ramas de la intersección mediante una representación gráfica (diagrama de flujo). A continuación, se muestra el diagrama correspondiente al aporte de la Av. San Martín. En la sección ANEXOS se colocará el resto de flujogramas.

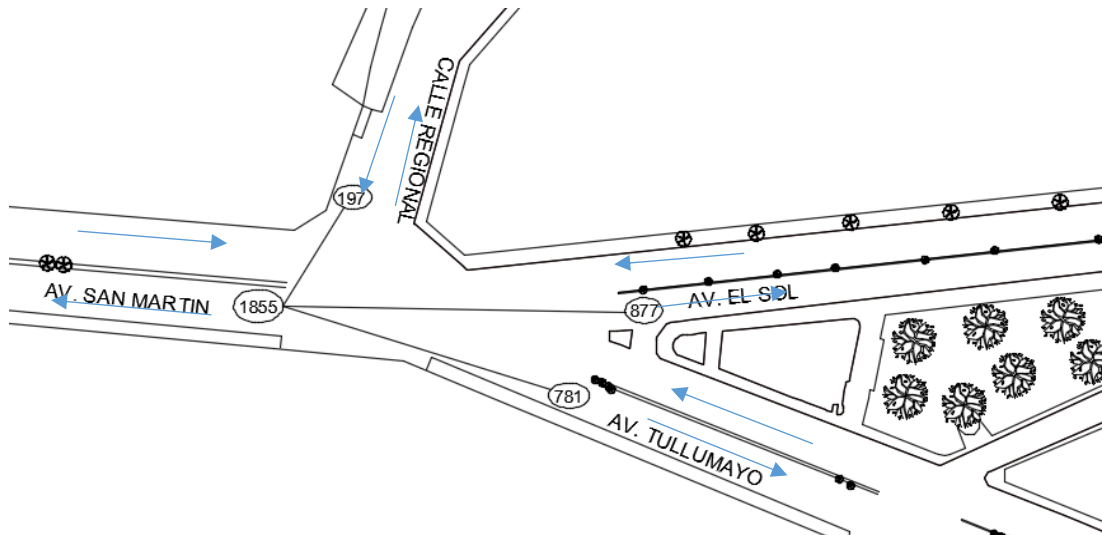


Figura 24. Diagrama de flujo Av. San Martín

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Distribución de Aforo vehicular avenida San Martín

Hora	CANTIDAD DE VEHÍCULOS				
	Autos	Buses	Combis	Motos	Camiones
7:15 a 7:30	301	21	19	21	2
7:30 a 7:45	391	18	24	9	5
7:45 a 8:00	536	24	20	10	3
8:00 a 8:15	394	22	25	8	2
<b>TOTAL</b>	<b>1622</b>	<b>85</b>	<b>88</b>	<b>48</b>	<b>12</b>

Fuente: Elaboración propia

➤ **Aforo peatonal**

De la misma forma se presentarán los datos correspondientes a la cantidad de peatones que circulan por la zona de estudio. En la siguiente imagen se presentan los puntos de recolección de los aforos peatonales en la intersección.

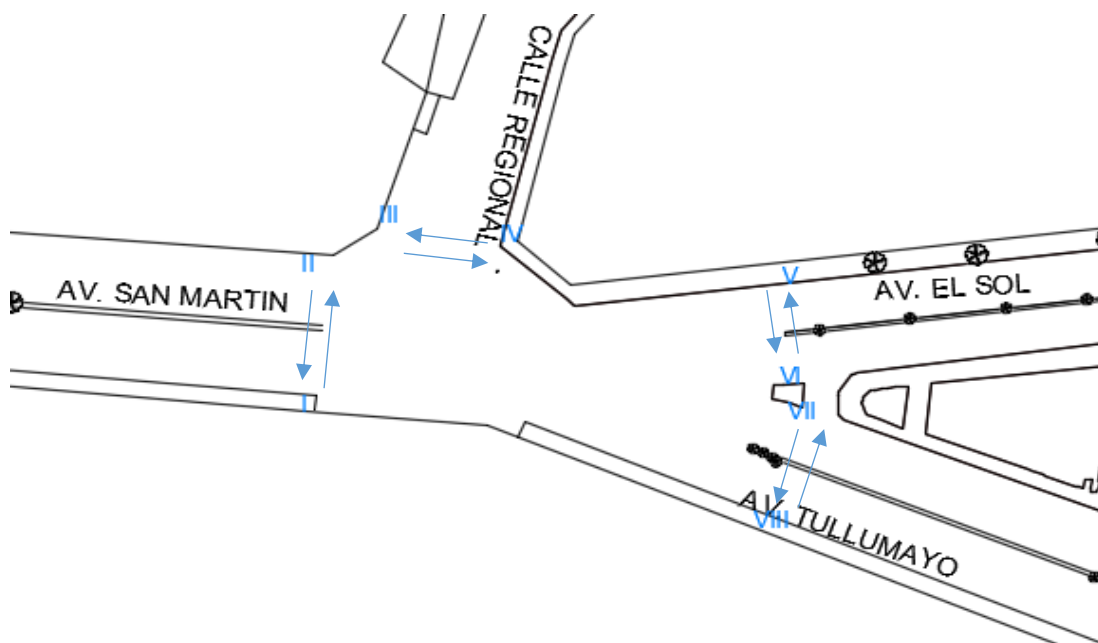


Figura 25. Puntos de recolección de peatones

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5, se presenta el aforo peatonal correspondiente a los puntos de recolección VII y VIII que se aprecian en la imagen anterior. El resto de aforos peatonales se muestran en los anexos.

Tabla 5. Distribución de Aforo peatonal

Personas	CANTIDAD DE PERSONAS							
	Adulto varon		Adulto mujer		joven varon		joven mujer	
Puntos	VII a VIII	VIII a VII	VII a VIII	VIII a VII	VII a VIII	VIII a VII	VII a VIII	VIII a VII
<b>Hora</b>								
7:15 a 7:30	5	2	2	3	2	1	1	1
7:30 a 7:45	7	4	6	6	4	3	4	3
7:45 a 8:00	6	3	7	5	3	2	3	2
8:00 a 8:15	9	8	6	8	7	4	8	5
<b>TOTAL</b>	<b>27</b>	<b>17</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>16</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>11</b>

Fuente: Elaboración propia



➤ **Tiempo de semáforos**

En la zona de estudio existen semáforos vehiculares y peatonales. A continuación, se presentan la duración de las fases de cada uno de ellos (en segundos) y los ciclos existentes en las siguientes imágenes.

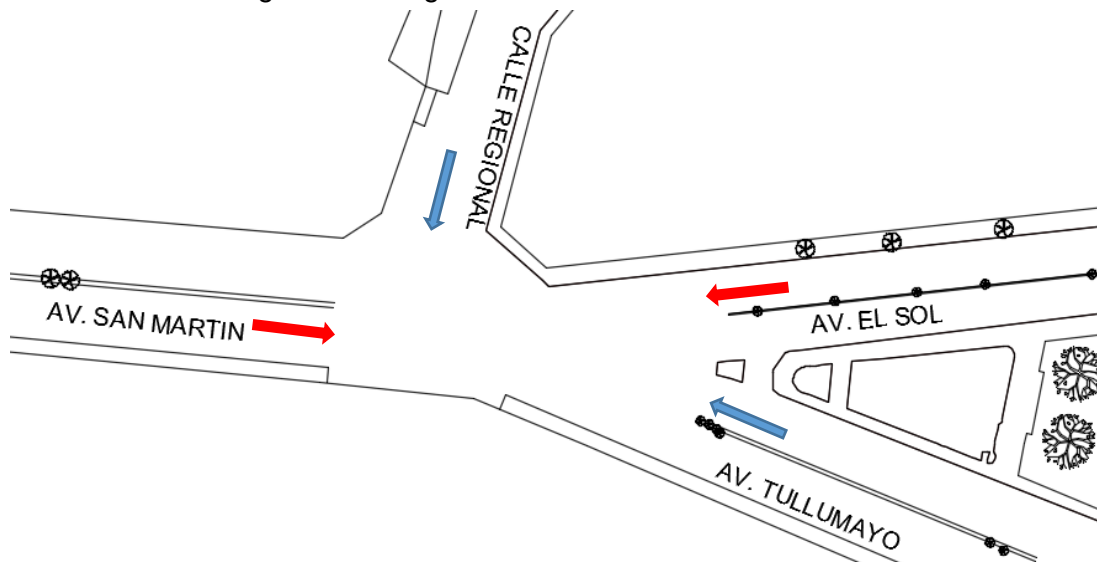
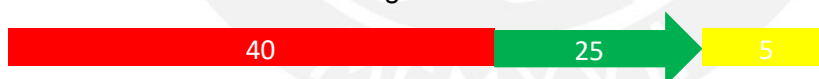


Figura 26. Ciclos de la intersección

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior, se aprecia los dos ciclos que existen en la intersección estudiada. La Avenida El Sol y la Avenida San Martín comparten un mismo ciclo. Por otro lado, la Calle Regional y la Avenida Tulumayo se rigen bajo el otro ciclo existente.

Semáforo Vehicular Calle Regional



Semáforo Vehicular Avenida San Martín



Semáforo Vehicular Avenida Tulumayo



Semáforo Vehicular Avenida El Sol



Figura 27. Duración de fases de los semáforos vehiculares

Fuente: Elaboración propia

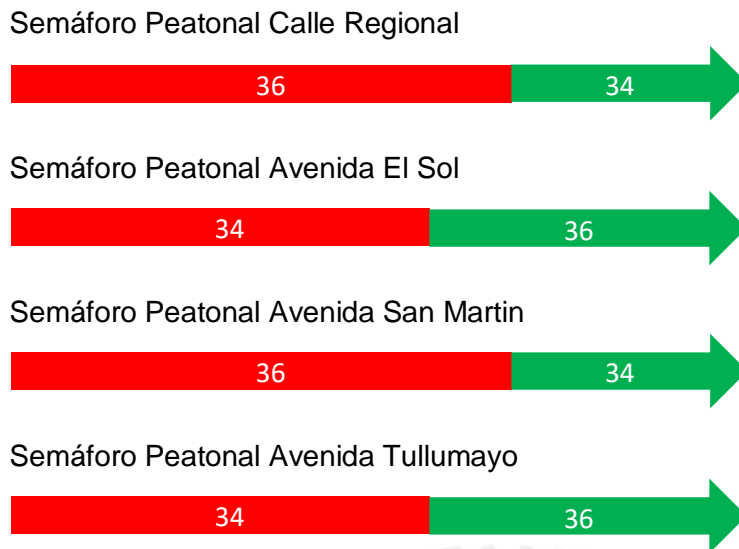


Figura 28. Duración de fases de los semáforos peatonales

Fuente: Elaboración propia

➤ **Geometría de la zona de estudio**

El plano que se obtuvo de la medición de la geometría de la intersección estudiada se puede observar en la sección Anexos.

➤ **Lista de chequeos**

Las observaciones a las características de la zona de estudio se encuentran en los Anexos.

## CAPÍTULO 5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA INTERSECCIÓN ESTUDIADA

### 5.1. Construcción del modelo

Al tener los datos de campo ya procesados, se procede con la construcción del modelo empleando los softwares Vissim y Viswalk en su octava versión. La información recolectada será usada como datos de entrada en la construcción del modelo. Los detalles de la elaboración del mismo se describirán en los siguientes apartados.

#### 5.1.1. Imagen de fondo (Background)

La referencia (mapa) para la construcción del modelo se obtuvo de Google Maps. La imagen empleada se muestra en la figura 28.

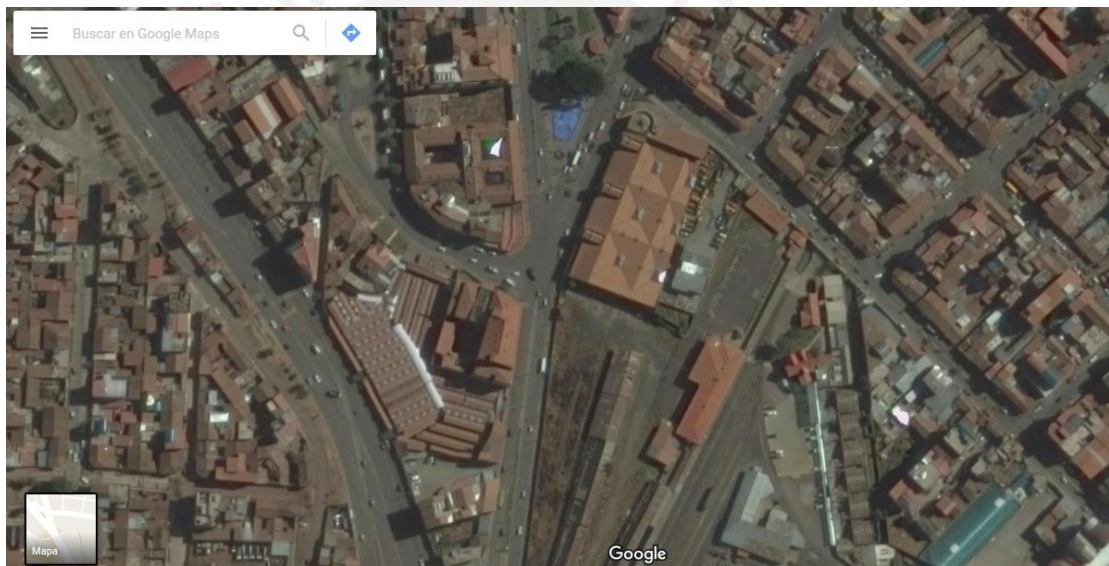


Figura 29. Imagen de fondo utilizada

Fuente: Google Maps (2016)

#### 5.1.2. Link y conectores

Los links y conectores se emplean para representar, en la construcción del modelo, las vías que componen la intersección. Para utilizar estos comandos se necesitan los siguientes datos recolectados en campo: el ancho de las vías, el número de carriles de las mismas, la dirección del tráfico permitido, entre otros.

En la figura 29 se aprecia el recuadro de interacción para colocar los datos necesarios para la creación de la Av. San Martín.

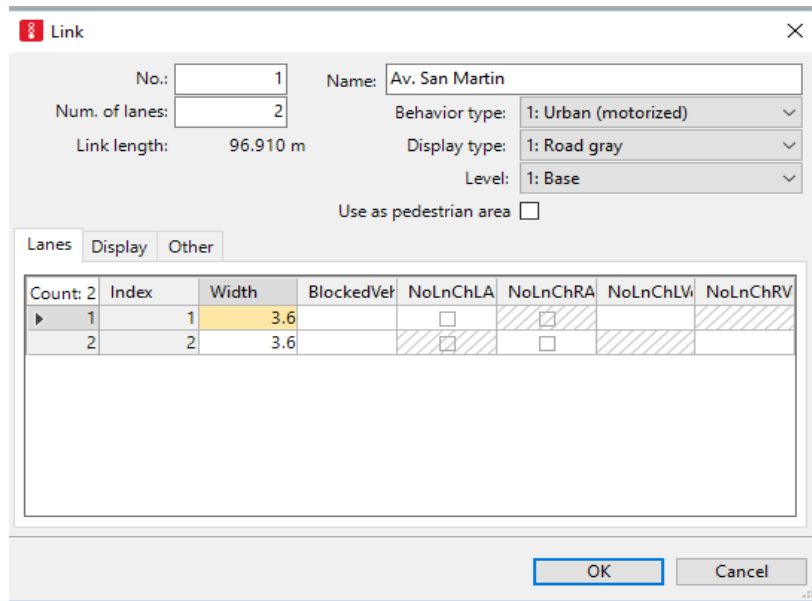


Figura 30. Recuadro de interacción de creación de un link

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3. Composición de vehículos y peatones

En el caso de los vehículos, para ingresar la clase, la velocidad, y el porcentaje del tránsito que circula por cada rama de la intersección se necesita usar la herramienta denominada “*Vehicle Compositions*”. En el entorno que se muestra en la figura 30, se observa que se ingresaron los datos recolectados en campo para la calle Regional.

Count	No	Name	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	1	Reg	Car	40: 40 km/h	0.877
2	2	SM	HGV	15: 15 km/h	0.014
3	3	Tullu	Bus	20: 20 km/h	0.047
4	310	com	com	40: 40 km/h	0.053
5	600	Bike	Bike	40: 40 km/h	0.009

Figura 31. Entorno Vehicle Compositions

Fuente: Elaboración propia

De manera similar se ingresaron los datos correspondientes al aforo peatonal. Estos se llevaron a cabo mediante el entorno de “*Pedestrian Compositions*”. El cuál es equivalente al mencionado anteriormente, pero para el caso peatonal. En la figura 31 se ilustra lo descrito.

Count	No	Name
1	1	Pedestrians
2	2	Commuters at a station
3	3	International Maritime

Count	PedType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	100: Man	1001: IMO-M 30-↓	0.450
2	200: Woman	1002: IMO-F 30-50	0.350

Figura 32. Entorno Pedestrian Compositions

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.4. Ingreso de datos

Luego de haber recreado la geometría de la intersección, mediante links y conectores, se procede a realizar la composición de peatones y vehículos que transitan en la zona de estudio. El siguiente paso se lleva a cabo a través de los llamados “*Vehicle Inputs*” y “*Pedestrian Inputs*” que son las herramientas de ingreso de volúmenes o cantidad de vehículos y peatones. Asimismo, se ingresa los tiempos de los semáforos, las rutas que siguen los vehículos, entre otros.

##### ➤ Entrada de vehículos y peatones

Como se describió anteriormente, se hace uso de las herramientas “Inputs” por separado para vehículos y peatones. En la figura 32, se observa los volúmenes ingresados de vehículos que transitan por cada vía de la intersección. De forma similar, se añaden las cantidades de peatones según el aforo obtenido en campo (figura 33).

Tabla 6. Volúmenes vehiculares

Vía	volumen vehicular
Calle Regional	529
Avenida El Sol	363
Avenida Tullumayo	770
Avenida San Martin	1855

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Volúmenes peatonales

Vía	volumen peatonal
Calle Regional	69
Avenida El Sol	90
Avenida Tullumayo	140
Avenida San Martin	78

Fuente: Elaboración propia

➤ **Asignación de rutas (vehicles routes-static)**

En este apartado se procede con la distribución del tránsito total según la cantidad de vehículos o peatones que transitan por una vía(ruta) de la intersección estudiada. En la imagen 34, se muestra la distribución vehicular de la calle Regional y el porcentaje correspondiente a las rutas que están permitidas desde esta entrada a la intersección estudiada.

Tabla 8. Distribución de aforo vehicular calle Regional

Vía	Rutas	Porcentaje
Calle Regional	Hacia Av. San Martin	0.238
	Hacia Av. Tullumayo	0.758
	Hacia Av. El Sol	0.004

Fuente: Elaboración propia

**5.1.5. Señales de control**

Para añadir, al modelo, controles semafóricos se deben de colocar los “*signal heads*” en los lugares de las vías donde se desea representar un semáforo. Antes de situar los “*signal heads*” se deben de programar en el entorno de “*signal control*” o señales de control. En este apartado se ingresa la duración de las fases de los semáforos existentes en la zona de estudio. En el caso de la intersección trabajada, se tienen semáforos vehiculares y peatonales. En la figura 35, se presenta la programación empleada para el modelo.

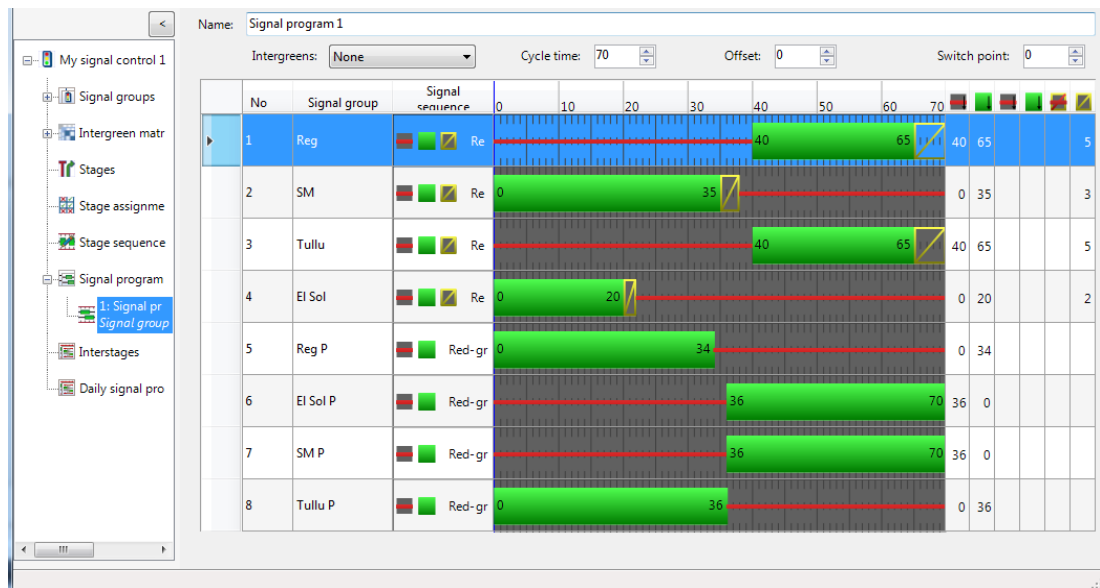


Figura 33. Tiempos de los semáforos y grupos de señales

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.6. Reglas de Prioridad

Antes de utilizar las reglas de prioridad en el modelo, se puede disponer de las áreas de conflicto. Estas son los cruces que se generan entre los links y conectores que componen el modelo. Las mismas que se crean automáticamente en los traslapes de conector con link. Se recomienda agotar, en primer lugar, este recurso para controlar el tráfico a modelar; ya que es más sencillo organizar el tránsito de esta manera. Normalmente, se necesitan de las reglas de prioridad como ayuda o complemento a las áreas de conflicto. Este es el caso de la intersección estudiada.

En la figura 36, se muestran las áreas de conflicto que se tienen en el modelo construido. Las áreas que son de color verde son las que poseen prioridad de pase frente a las de color rojo. Además, se pueden observar las reglas de prioridad representadas por líneas (figura 37). Estas deben de brindar la prioridad de circulación al peatón frente a los vehículos; ya que se considera la posibilidad de que un peatón se quede a la mitad de cruzar una vía y el semáforo cambie a verde para los automóviles.

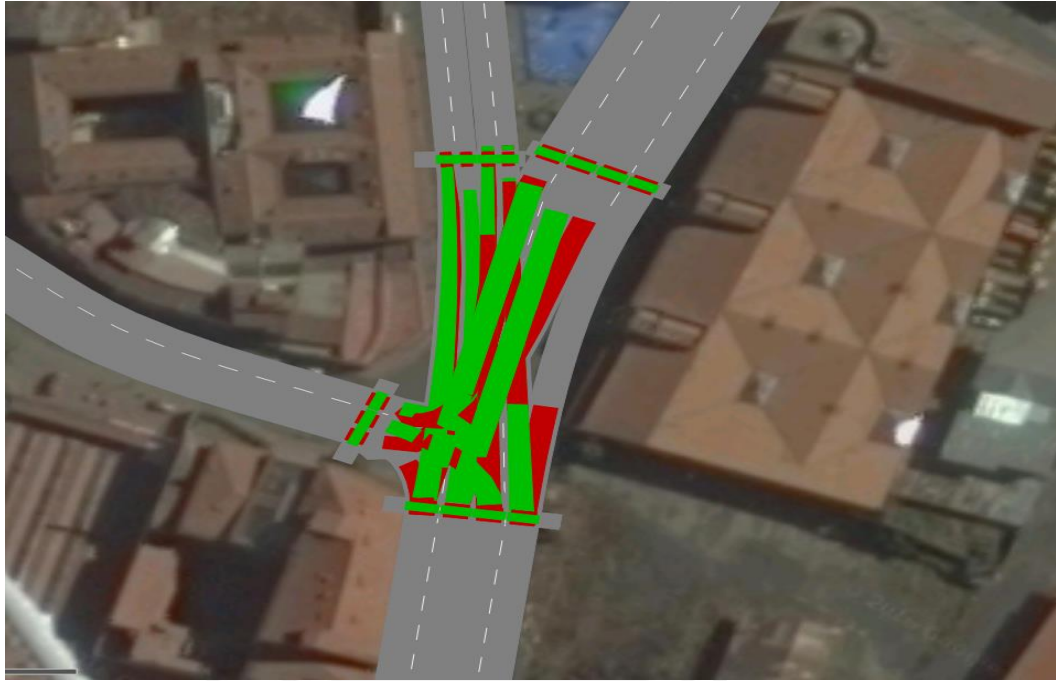


Figura 34. Áreas de conflicto

Fuente: Elaboración propia



Figura 35. Reglas de prioridad

Fuente: Elaboración propia



## 5.2. Verificación del modelo

La verificación del modelo se realiza con el fin de identificar posibles errores en el ingreso de los datos recogidos en campo como las fases de los semáforos, aforos vehiculares y peatonales, entre otros.

En el proceso de revisión, se encontró que las longitudes de cola de Calle Regional y Avenida El Sol variaban de forma abrupta. Esto debido a que en esas vías se detenían buses de turismo, para recoger turistas de los hoteles ubicados en las vías señaladas, interrumpiendo el tránsito en tiempos variables. Por ello, se eligió como parámetro de eficiencia, para calibrar el modelo, el tiempo de viaje en un intervalo de la intersección estudiada; ya que se pudo grabar detenidamente esta ubicación con una de las filmadoras usadas.

## 5.3. Calibración del modelo

El proceso de calibración se puede llevar a cabo empleando el modelo de Wiedemann 74 o 99. En este caso, al ser una intersección ubicada en una zona urbana, se utilizó el modelo de Wiedemann 74. La calibración se basa en conseguir que el modelo refleje la realidad mediante la modificación de los parámetros de Wiedemann. En este estudio se empleó como parámetro de eficiencia el tiempo de viaje en un tramo de 21 metros aproximadamente ubicado en la conexión de Av. San Martín con Av. El Sol. El tiempo promedio que se registró fue de 3.70 segundos con una desviación estándar de 0.13 segundos.

Por otra parte, en el caso de la calibración peatonal se utilizó el mismo parámetro de eficiencia en el tramo que corresponde al cruce peatonal de Av. Tulumayo (9.90 metros de longitud). Los parámetros, incluidos en Viswalk, que poseen una influencia más notoria en el comportamiento de los peatones son: Tau y Lambda. El primero representa la disposición del peatón para moverse con mayor rapidez a su destino. Mientras que el segundo involucra la cantidad de personas que existen como obstáculos en el camino del peatón analizado. Por lo que, se calibró la parte peatonal del modelo modificando los parámetros mencionados.

En la siguiente figura se muestra el tramo evaluado, limitado entre dos líneas de color claro, para la calibración vehicular. Y para la calibración peatonal se señala el tramo analizado encerrado en una elipse de borde amarillo.



Figura 36. Intervalo evaluado para la calibración

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.1 Parámetros de análisis

En el caso vehicular para empezar con la calibración se empleó, en la primera prueba, los parámetros de Wiedemann incluidos por defecto en el software y de acuerdo a los resultados obtenidos se comenzó a iterar los mismos. En cuanto al número de corridas, se incorporó 15 por cada prueba. Esta cantidad de corridas es superior al mínimo sugerido por FHWA (2004). A continuación, se muestra, en la tabla 9, la cantidad de pruebas realizadas, los parámetros usados y los resultados en cada caso.

Tabla 9. Parámetros y resultados en cada intento ejecutado

Prueba N°	Parámetros de Wiedemann 74			Valores Vissim	
	$a_x$	$b_{x\ add}$	$b_{x\ mult}$	Media	Desv. Estd
1	2	3	3	3.63	0.27
2	2	2	3	3.53	0.26
3	1.25	3	3	3.68	0.26
4	1.5	4	4	3.63	0.28
5	1.5	3.5	3.5	3.52	0.29
6	1.5	3.5	3	3.64	0.33
7	1	5	4	3.79	0.31
8	1	5	3	3.71	0.20
9	1	4.75	4.75	3.65	0.25
10	1	4.75	4	3.81	0.27
11	1	4.75	4.25	3.69	0.28
12	1	4.75	4.5	3.74	0.26
13	1	4.25	4.75	3.71	0.21
14	1	4.25	4.25	3.67	0.21
15	1	4.25	4	3.76	0.24
16	1	4.5	4.75	3.60	0.26
17	1	4.5	4.5	3.65	0.30
18	1	4.5	4	3.68	0.24
19	1	3	5	3.67	0.29
20	1	3	4.5	3.60	0.26
21	1	3	4	3.65	0.19
22	1	3	3	3.61	0.20
23	1	3	2	3.70	0.24
24	1	2	2	3.62	0.22
25	0.5	2	2	3.54	0.29

Fuente: Elaboración propia

Los valores predeterminados de los parámetros  $a_x$  (distancia promedio deseada entre vehículos detenidos),  $b_{x\ add}$  (parte aditiva de la distancia deseada por seguridad) y  $b_{x\ mult}$  (parte multiplicativa de la distancia deseada por seguridad) son 2 3 y 3, con estos valores se realizó la primera prueba y se obtuvo como media de tiempo de viaje de los vehículos 3.63 segundos con una desviación estándar de 0.27 segundos. Se observó que la media muestral obtenida en campo (3.70 segundos) se encontraba próxima a este primer valor hallado, mas no se podía considerar un valor de 2 metros de distancia entre vehículos detenidos por el comportamiento de manejo del conductor peruano. Por lo que, se procedió con la iteración de valores de los parámetros, realizándose un total de 25 intentos. Entre las pruebas ejecutadas, se destacaron los intentos número 11, 13 y 23; ya que estos poseían una media de tiempo de viaje de los vehículos muy cercana a la recogida en campo. Además, la distancia de separación entre vehículos detenidos se reflejaba con mayor similitud a la realidad del Perú.

En las siguientes líneas, se introduce el medio usado para comprobar la calibración del modelo y su posterior validación.

Una vez obtenidos los resultados del software, se analiza las medias del parámetro de eficiencia empleado para la calibración (tiempo de viaje) de todos los intentos. Luego, se procede a verificar que los parámetros de Wiedemann que representen de manera lógica la realidad del estilo de manejo del conductor peruano promedio. De esta selección, se obtuvo las pruebas remarcadas en la tabla 9 (11, 13 y 23). Entre este grupo, se destaca la prueba número 23; ya que la media obtenida en este caso es muy similar que la obtenida en campo (3.70 segundos), solo diferenciándose en centésimas.

Por otro lado, para demostrar que el modelo se encuentre calibrado se evaluaron estos tres candidatos con la herramienta denominada StatKey. Esta permite realizar un análisis estadístico a dos conjuntos de muestras llamada “*Randomization Test for a Difference in Means*”. El cual se conforma de cuatro pasos de análisis. El primer paso se centra en hallar la diferencia de medias entre ambas muestras. Luego, se computa el número de formas en que puede ser dividido el total de datos en agrupaciones dependiendo del número de datos de cada muestra. Para este paso se utiliza la siguiente ecuación.

<p>Ecuación 9</p> $W = \frac{N!}{n_1! * n_2!}$	<p>Donde:</p> <p>W: Número de formas de agrupación de datos</p> <p>N: Número total de datos</p> <p><math>n_1</math>: Número total de datos del grupo 1</p> <p><math>n_2</math>: Número total de datos del grupo 2</p>
--	---

El tercer paso se basa en determinar, de entre el total de los nuevos arreglos formados, la cantidad de agrupaciones que poseen una media igual o mayor a la de cada grupo de datos iniciales. Por último, se halla la probabilidad de que las agrupaciones representativas (las que poseen medias mayores o iguales a los grupos iniciales) representen el valor de media obtenido en el software con respecto al recolectado de campo con un 95% de confiabilidad. Este procedimiento permite plantear la prueba de hipótesis. Para el caso de estudio, se cotejó 17 muestras de campo contra 15 obtenidas del software.

A continuación, se muestra, en la tabla 10, los datos analizados. Asimismo, los resultados obtenidos de la prueba de mejor afinidad de calibración lograda, parámetros  $a_x = 1$ ,  $b_{x\ add} = 3$  y  $b_{x\ mult} = 2$ , se presentan en la figura 37. En esta figura se observa la diferencia de medias entre las muestras y se aprecia que se encuentra dentro del rango del 95 % de confiabilidad (sombreado negro), lo que afirma que la hipótesis nula ( $\mu_1 = \mu_2$ ) se acepta. Esto corrobora la correcta calibración.

Tabla 10. Datos obtenidos de campo y software para la calibración vehicular

Tiempo de viaje (segundos)	
VISSIM	CAMPO
3.98	3.60
3.28	3.65
3.60	3.90
3.78	3.58
3.64	3.68
3.81	3.95
3.58	3.70
3.38	3.59
3.26	3.65
4.00	3.48
3.74	3.55
4.00	3.78
3.87	3.70
3.76	3.80
3.80	3.65
-	3.58
-	3.85

Fuente: Elaboración propia

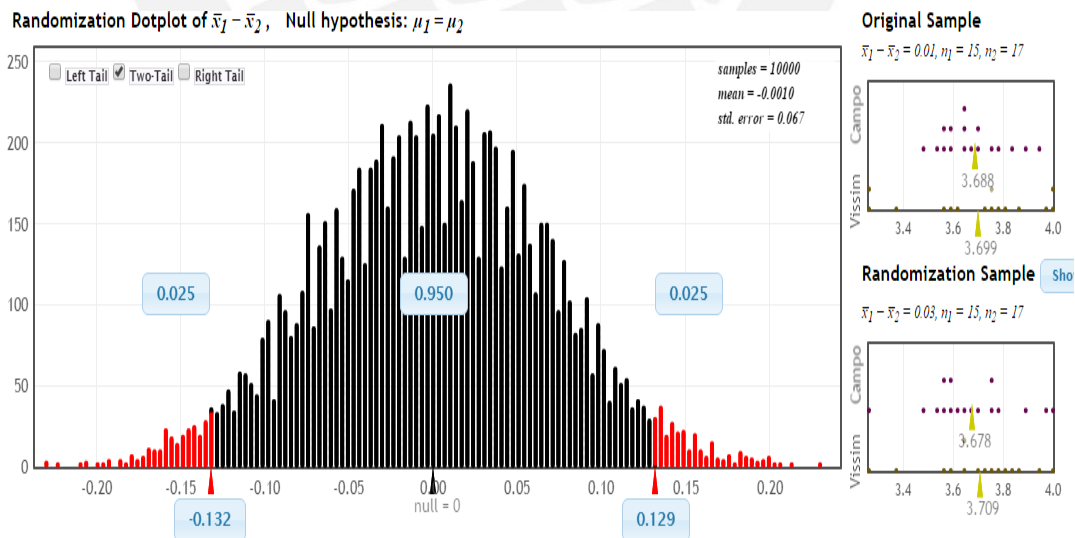


Figura 37. Diagrama de calibración vehicular

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la calibración de la representación peatonal en el modelo, se realizó de forma similar a la realizada en el caso vehicular. Para este análisis se comparó 21 datos de campo y 15 extraídos del software. En la tabla 11, se presentan los datos utilizados en el proceso. Asimismo, se presenta, en la figura 38, el diagrama de calibración peatonal que se logró modificando los parámetros que representan el modelo de la Fuerza Social en Viswalk. Considerando las variables de mayor influencia antes mencionadas, se llegó a la calibración con los valores de Tau = 0.1 y Lambda = 0.176. Por otra parte, se observa que la hipótesis nula ( $\mu_1 = \mu_2$ ) se acepta; ya que la diferencia de medias se aloja en el intervalo del 95% de confianza (sombreado negro). Esto demuestra que se alcanzó satisfactoriamente la calibración.

Tabla 11. Datos obtenidos de campo y software para la calibración peatonal

Tiempo de viaje (segundos)	
VISWALK	CAMPO
31.69	31.60
32.28	32.51
33.89	32.63
30.77	33.35
34.42	33.23
31.97	32.82
33.18	33.64
29.88	31.75
34.95	33.65
33.02	32.46
30.08	31.45
33.52	30.78
33.33	30.90
36.08	33.80
37.18	32.50
-	32.87
-	31.70
-	32.80
-	33.10
-	32.78
-	32.60

Fuente: Elaboración propia

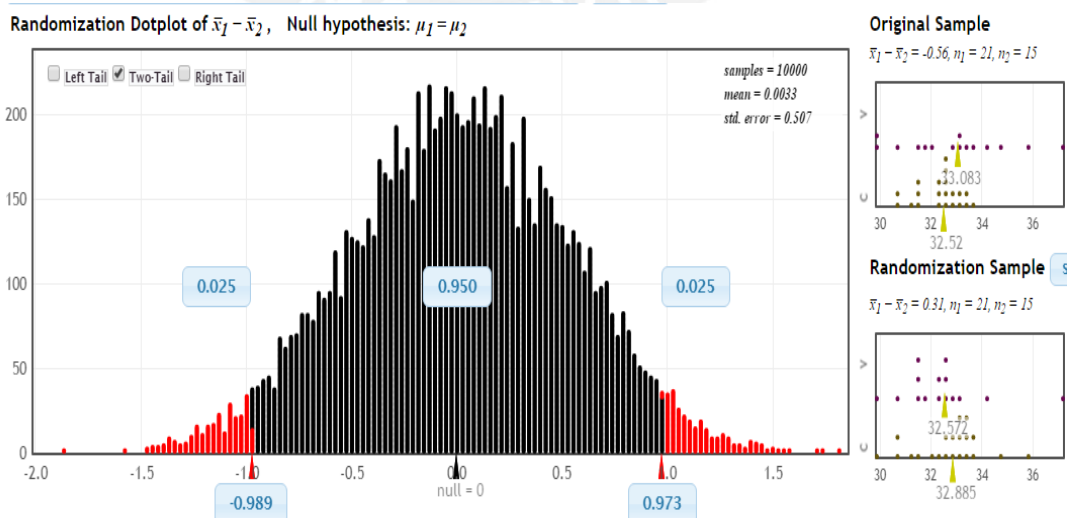


Figura 38. Diagrama de calibración peatonal

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4. Validación del modelo

Una vez calibrado el modelo, se procede a la validación del mismo. Este proceso se basa en cambiar los datos de entrada, usados para la creación del modelo, por otros recolectados en campo. Estos nuevos datos se obtuvieron en el periodo de 1 hora (8:15 a.m. - 9:15 a.m.) el día lunes 18 de Julio del 2016. En la siguiente figura, se muestra el diagrama de flujo obtenido de la Av. San Martin. El resto de aforos se pueden observar en la sección de anexos.

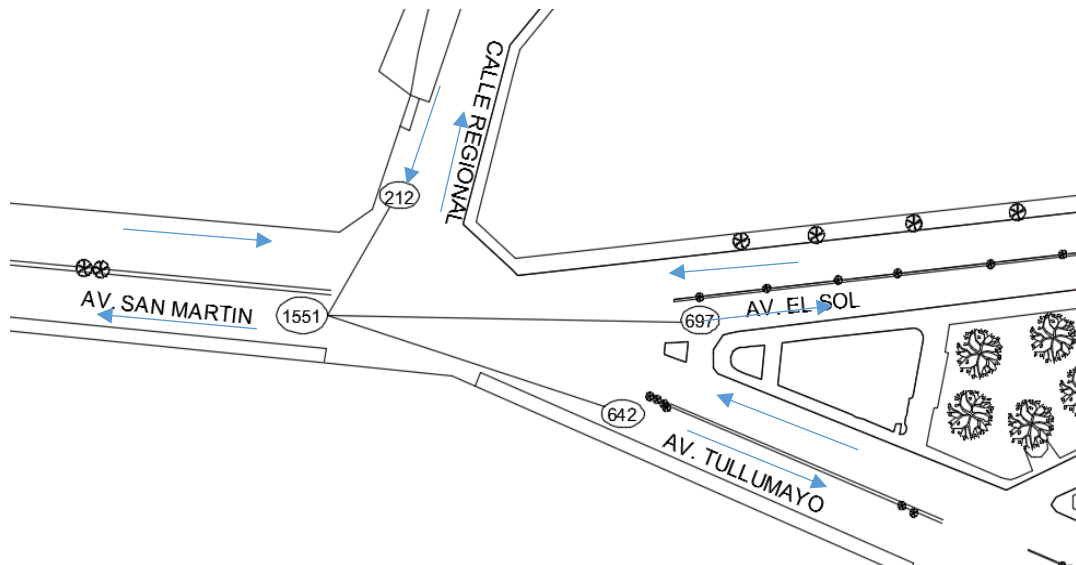


Figura 39. Diagrama de flujo Av. San Martín

Fuente: Elaboración propia

Para este proceso, se emplea nuevamente la herramienta de análisis estadístico StatKey para comparar los resultados de campo con los del software de manera similar a la etapa de calibración del modelo. El parámetro de eficiencia empleado fue el tiempo de viaje de los vehículos. En la siguiente tabla se observan los datos de campo y del programa a ser analizados.

Tabla 12. Datos obtenidos de campo y software para la validación vehicular

Tiempo de viaje (segundos)	
VISSIM	CAMPO
3.88	3.70
4.08	3.78
3.46	3.88
3.67	3.90
3.69	4.10
3.91	3.79
3.36	3.67
4.00	3.58
3.55	3.69
3.52	3.85
4.09	3.77
3.85	3.95
3.14	3.80
4.07	3.68
3.57	4.20
-	3.95
-	3.69

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente imagen se observa los resultados obtenidos del StatKey, se aprecia que la diferencia de medias de las muestras comparadas se encuentra en la zona sombreada de negro (95% de confiabilidad). Esto corrobora que se acepta la hipótesis nula ( $\mu_1 = \mu_2$ ). Por lo que, la validación es correcta y que el modelo puede ser usado para el estudio de diferentes casos.

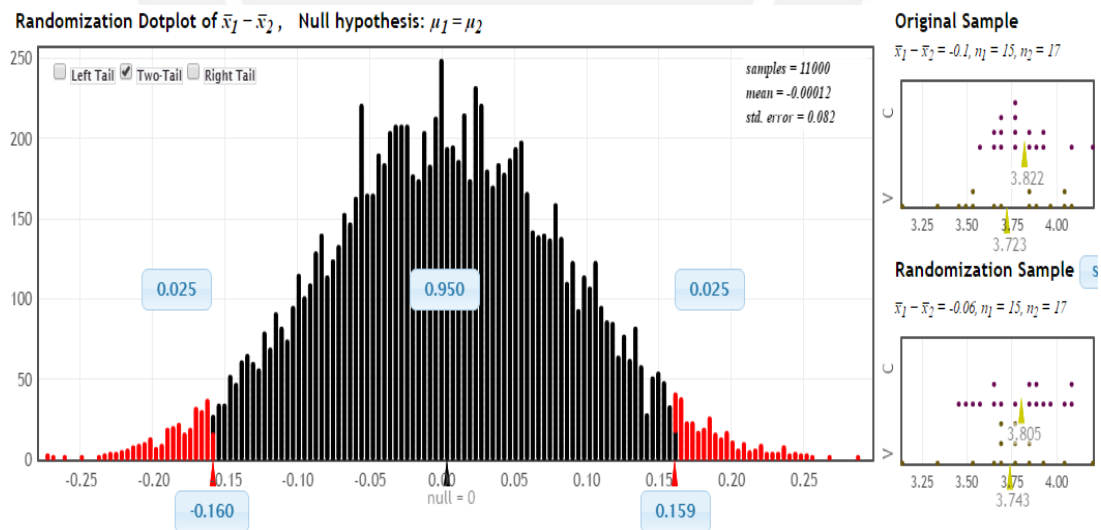


Figura 40. Diagrama de validación vehicular

Fuente: Elaboración propia



De la misma manera se procede con la validación peatonal del modelo. En la tabla 13 se muestra los datos de campo y del software evaluados. Igualmente, en la imagen 41, se presenta el diagrama de validación peatonal que se obtuvo con la ayuda de la herramienta StatKey. En la gráfica se puede observar que la diferencia de medias de los datos analizados se localiza en la zona del 95% de confiabilidad (sombreada de negro). Esto señala que se acepta la hipótesis nula ( $\mu_1 = \mu_2$ ) y se confirma la validación requerida para el uso del modelo construido.

Tabla 13. Datos obtenidos de campo y software para la calibración peatonal

Tiempo de viaje (segundos)	
VISWALK	CAMPO
35.75	33.40
34.65	35.60
31.39	34.70
31.38	33.35
34.72	33.23
39.13	32.82
37.56	33.64
37.33	34.67
31.20	33.65
30.99	32.46
36.84	33.56
33.96	33.95
34.66	32.86
33.10	33.80
31.60	32.50
-	32.87
-	33.60
-	32.80
-	33.10
-	32.78
-	32.60

Fuente: Elaboración propia

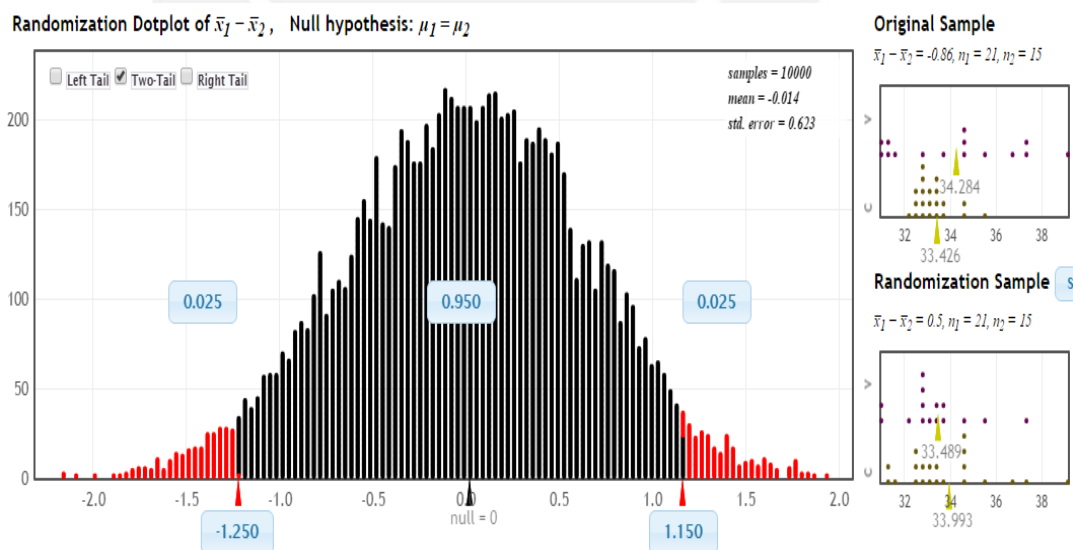


Figura 41. Diagrama de validación peatonal

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA MICRO-SIMULACIÓN INTERMODAL DESARROLLADA

### 6.1 Análisis de resultados

Con el fin de cumplir con el objetivo planteado de proponer mejoras al funcionamiento de la situación actual de la intersección estudiada, se debe de analizar la misma para saber que fallas o malos funcionamientos posee. Para lograr este proceso, se recolectó datos de campo en intervalos de una hora en dos ocasiones. Entre estas tomas de datos, en el caso vehicular, se destaca la realizada para la calibración; ya que se desarrolló en plena hora punta y, además, el aforo vehicular es mayor que en la recolección de datos para la validación. Por otro lado, el aforo peatonal es superior en la etapa de la validación. Por lo tanto, se trabajará con las situaciones más críticas mencionadas. En la siguiente tabla se muestra aforos totales de calibración y validación.

Tabla 14. Demandas vehiculares de calibración y validación

Vías	Etapas	
	Calibración (vehículos/hora)	Validación (vehículos/hora)
Av. San Martin	1855	1551
Av. Tullumayo	770	786
Av. El Sol	363	407
Calle Regional	529	350
<b>TOTAL</b>	<b>3517</b>	<b>3094</b>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Demandas peatonales de calibración y validación

Vías	Etapas	
	Calibración (peatones/hora)	Validación (peatones/hora)
Calle Regional	69	88
Av. El Sol	90	100
Av. Tullumayo	140	187
Av. San Martin	78	106
<b>TOTAL</b>	<b>377</b>	<b>481</b>

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los parámetros de evaluación del comportamiento del tráfico vehicular y peatonal en la intersección estudiada.

### ➤ Longitudes de cola

Las longitudes de cola se recolectaron desde puntos estratégicos en la zona de estudio con el apoyo de la segunda filmadora. Cada vez que la fase de uno de los semáforos tocaba rojo se medía la longitud de vehículos correspondiente a los cuatro accesos a la intersección desarrollada. En la siguiente tabla se aprecia, por cada entrada a la intersección, la longitud de cola promedio correspondiente.

Tabla 16. Longitudes de cola promedio

Vías	Longitud de cola (m)
Av. San Martin	127
Av. Tullumayo	86
Av. El Sol	16
Calle Regional	63

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que, en la vía de entrada correspondiente a la Avenida San Martin, se genera la mayor longitud de cola con un valor de 127 m. En este acceso se evidencia un gran problema de aglomeración de vehículos, aproximadamente de 32 vehículos en fila, debido a que esta Avenida es una de las principales vías de acceso al centro de la ciudad y en hora punta es una de las más transitadas. Además, esta extensión considerable se forma debido a que, desde este acceso, se puede realizar un giro con dirección a la Calle Regional, pero que depende de que en la Avenida paralela (Av. El Sol) no se encuentren transitando vehículos para poder concretar el giro mencionado. Lo que provoca la larga cola de espera en uno de sus carriles. En el otro carril se ubica un paradero de buses de servicio público causando un problema similar. Por otro lado, la menor longitud de cola se presenta en la Avenida El Sol con una extensión de 16 m que representan 4 vehículos, en fila, aproximadamente.

### ➤ Velocidades de viaje

La velocidad de viaje que se obtuvo fue de 21 Km/h por vehículo en promedio en la intersección estudiada. Por lo que, se puede manifestar que el funcionamiento de la zona de estudio, según este parámetro, no es muy apropiado por la lentitud del desplazamiento de los vehículos; ya que en su mayoría son móviles particulares los que circulan por la intersección.

Por otro lado, la velocidad promedio de los usuarios de a pie fue de 2.5 km/h. Esto refleja que las personas recorren un metro en menos de 1.5 segundos. La mayor cantidad de personas, especialmente turistas, que se desplazan en el lugar de estudio en horas posteriores a la hora punta (7:15 a.m. a 8:15 a.m.) genera mayor tráfico

peatonal. La dirección preferida de los visitantes de la ciudad del Cusco, que se movilizan por esta zona, es un centro artesanal ubicado en la Av. Tullumayo. La conexión entre la Av. El Sol y la Av. Tullumayo es la más utilizada. Por lo que, se puso especial énfasis en mejorar la experiencia de tránsito peatonal en el tramo mencionado.

### ➤ Demora de viaje

La demora de viaje es un parámetro de eficiencia muy importante; ya que el tiempo que representa demuestra la efectividad, en este caso, de la intersección para movilizar vehículos desde un punto inicial hasta su lugar de deseo. Esta demora significará la aglomeración mayor o menor de vehículos en la zona de estudio. En el caso de la intersección elegida, se obtuvo una demora promedio de 39.27 segundos. Este valor refleja un funcionamiento regular de la zona de estudio.

En el caso de los peatones, la demora promedio fue de 35.62 segundos en el tramo más crítico (de Av. El Sol a Av. Tullumayo). Este dato nos indica que los usuarios de a pie realizan el desplazamiento con el tiempo demasiado justo. En otras palabras, no se brinda la comodidad de un movimiento holgado y tranquilo para los usuarios; ya que el tiempo máximo que se proporciona para cruzar esta conexión es de 36 segundos.

## 6.2 Propuestas de mejora

Se plantearon, en total, tres posibles propuestas de mejora que aparte de la modificación de la geometría incluían: la primera, la construcción de una mini rotonda en la intersección estudiada. La segunda, el cambio de sentido de la calle Regional. Y la tercera, la modificación de las fases y ciclos de los semáforos. De las tres propuestas, se descartaron las primeras dos. La primera porque el espacio existente en la zona de estudio no era el suficiente para albergar a una mini rotonda y que funcionase adecuadamente. La segunda debido a que se necesitarían mayores estudios en las intersecciones o cruces aledaños a la zona de estudio para poder apreciar el impacto real que generaría el cambio propuesto.

Con respecto a la propuesta elegida. En primer lugar, se propone modificaciones a la geometría de la intersección trabajada; ya que existen espacios “muertos” en la zona de estudio que podrían ser aprovechadas en beneficio de los peatones. Por otro lado, estas modificaciones también mejorarán el transporte vehicular. Adicionalmente, se propone una modificación en las fases y ciclos de los semáforos

con el fin de lograr un desplazamiento del tráfico más fluido sin afectar el transitar de los peatones.

En el caso de la geometría, se realizaron desde cambios menores como alineamiento y continuidad de rampas de acceso para discapacitados hasta modificaciones de las islas de espera de peatones y señalización completa (demarcación de carriles, cruceo peatonal, entre otros) de la Calle Regional (no se encontraron ni marcas desgastadas de señalización).

Para que la modificación de la geometría no afecte negativamente al tráfico vehicular, se hizo uso del software Auto TURN, que permite observar el camino y espacio que necesitarán los vehículos para realizar todas las maniobras permitidas en la intersección trabajada. Este programa se basa en pruebas estadísticas realizadas a todo tipo de vehículos desde automóviles hasta vehículos de alto tonelaje, contando con una gran variedad de vehículos para emplear al realizar un análisis. En la siguiente figura, se aprecia cómo trabaja el software y la información que nos brinda.

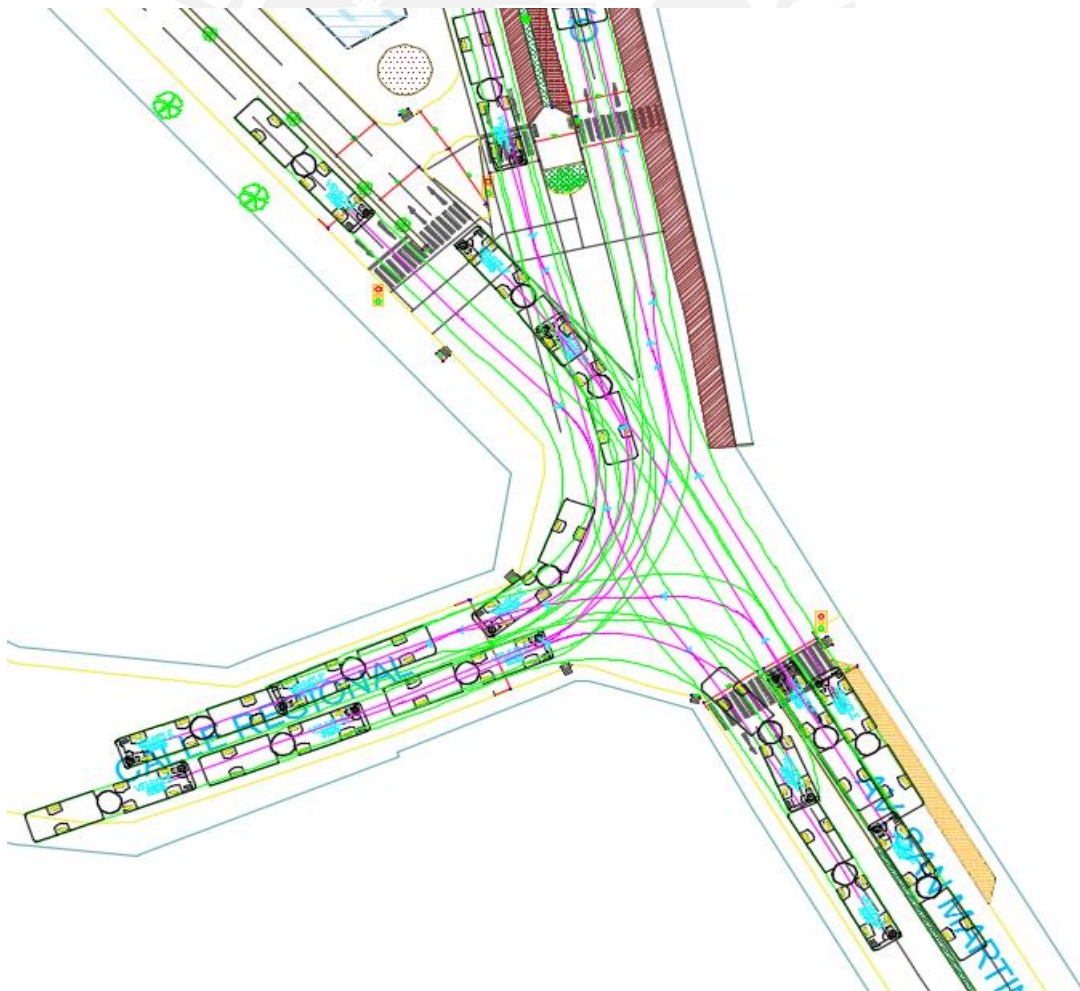


Figura 42. Uso del software Auto TURN

Fuente: Elaboración propia

En la figura 40, se aprecia, entre otros datos, el espacio que necesitan los vehículos para girar. Esto fue fundamental para poder modificar, entre otros elementos, la isla existente entre las Avenidas El Sol y Tullumayo; ya que se tiene una clara perspectiva de hasta qué punto es posible incrementar el tamaño de esta isla para beneficiar a los usuarios de a pie sin generar un problema al tránsito vehicular.

En la figura 41, se aprecia el estado actual de la intersección estudiada. Por otro lado, en la imagen 42 se observa la intersección trabajada con las mejoras a la geometría aplicadas.

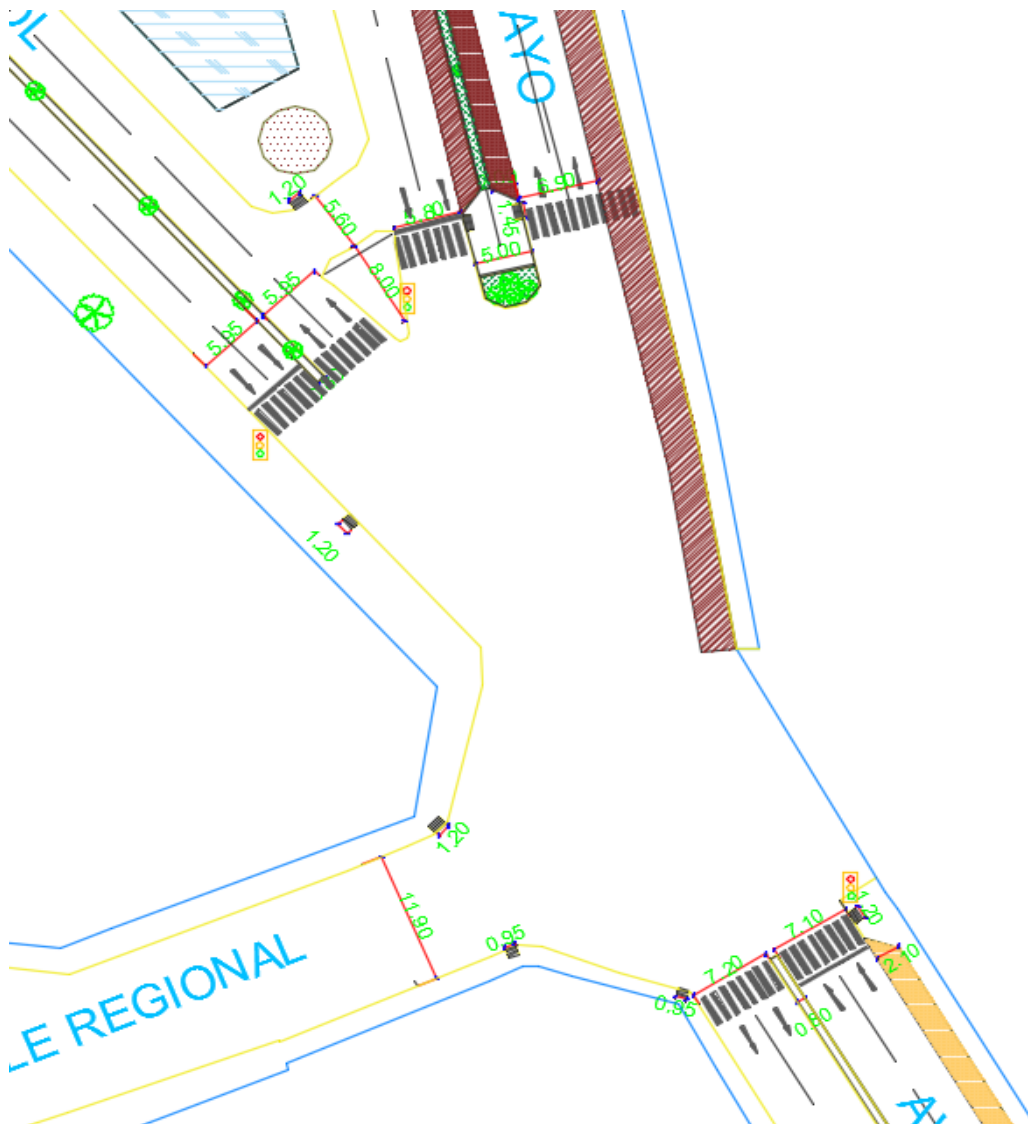
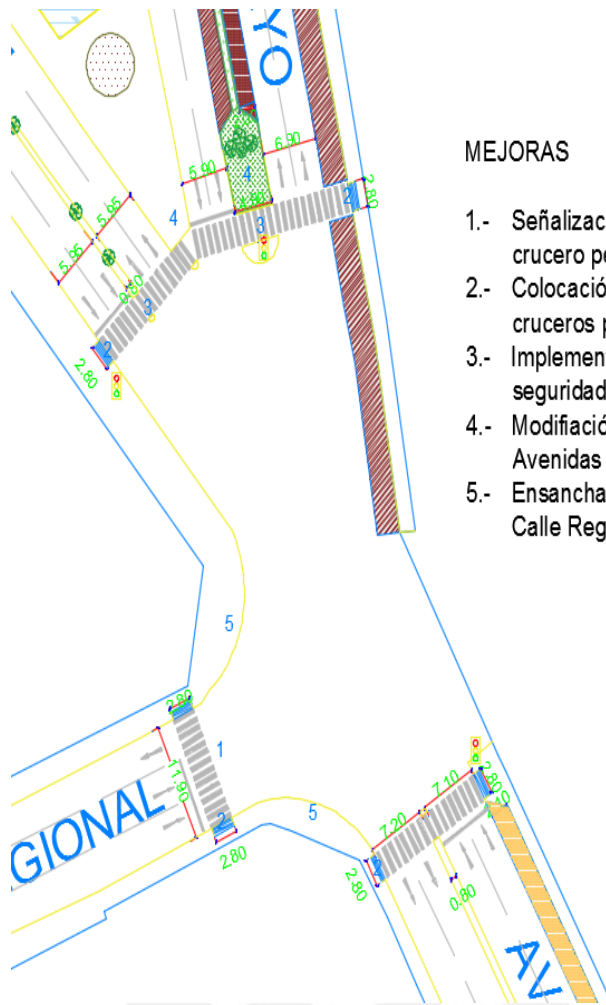


Figura 43. Intersección estado actual

Fuente: Elaboración propia



#### MEJORAS

- 1.- Señalización de la Calle Regional (demarcación de carriles y cruceo peatonal).
- 2.- Colocación y alineamiento de rampas de acceso en los cruces peatonales en la intersección.
- 3.- Implementación de espacios a nivel de la pista en las islas de seguridad de las Avenidas El Sol, Tullumayo y San Martín.
- 4.- Modificación de dimensiones y diseño de las islas de las Avenidas El Sol y Tullumayo.
- 5.- Ensanchamiento de las veredas en el lugar de giros hacia Calle Regional.

Figura 44. Intersección con mejoras aplicadas

Fuente: Elaboración propia

En la figura 42, se muestra las mejoras en la geometría, de la zona de estudio, logradas que consisten en: la señalización de la Calle Regional, la alineación e incorporación de la señalización de los cruces peatonales, la creación de espacios a nivel de la pista en las islas peatonales y la alineación y colocación de rampas que guarden continuidad con los cruces peatonales para facilitar la movilización de personas con discapacidad, el aprovechamiento de espacios no utilizados por los vehículos para maximizar las veredas peatonales (principalmente en los giros hacia Calle Regional) y la reducción de distancia de recorrido de los vehículos, para cruzar la intersección, desde Av. El Sol y desde Av. Tullumayo hacia las distintas salidas permitidas. Esta última mejora se logró al realizar las modificaciones a las islas peatonales, y el alineamiento de cruces peatonales de las mismas vías. Lo que permitió mover las líneas de parada en 3.1 metros (en Av. El Sol) y 7.7 metros (en

Av. Tullumayo) ayudando a disminuir además de la distancia el tiempo que necesitan los vehículos para desplazarse desde esas vías.

Por otra parte, en el caso de la modificación a las fases y ciclos de los semáforos se planteó, inicialmente, el uso de 3 ciclos en vez de los 2 ciclos originales de la intersección estudiada. Un ciclo para las Avenidas El Sol y San Martín, un segundo ciclo para la Calle Regional y el tercer ciclo para la Avenida Tullumayo. Además, se modificaría la duración (70 segundos actualmente) de los ciclos hasta un máximo de 90 segundos recomendados para este tipo de intersecciones urbanas. Adicionalmente, se propuso división de Calle regional en dos carriles de entrada y uno de salida; ya que no se encontró delimitación alguna en esta vía.

Después de realizar las pruebas correspondientes con el modelo construido, se encontró que la mejor propuesta sería el plantear dos carriles de salida en la Calle Regional y uno de entrada, además de conservar los 2 ciclos iniciales de la intersección. Y modificar la duración de los ciclos de 70 a 90 segundos. Analizando esta combinación de propuestas se llegaron a mejores resultados en la evaluación de la zona de estudio.

En la figura 43, se muestran las fases y ciclos de los semáforos con los que se lograron beneficios considerables en cuanto a la reducción de longitudes de colas, tiempos de viaje y demoras en la zona estudiada. En la imagen, se aprecia que las Avenidas El Sol y San Martín poseen un solo ciclo. En cuanto a la Calle Regional y la Avenida Tullumayo comparten el segundo ciclo existente.

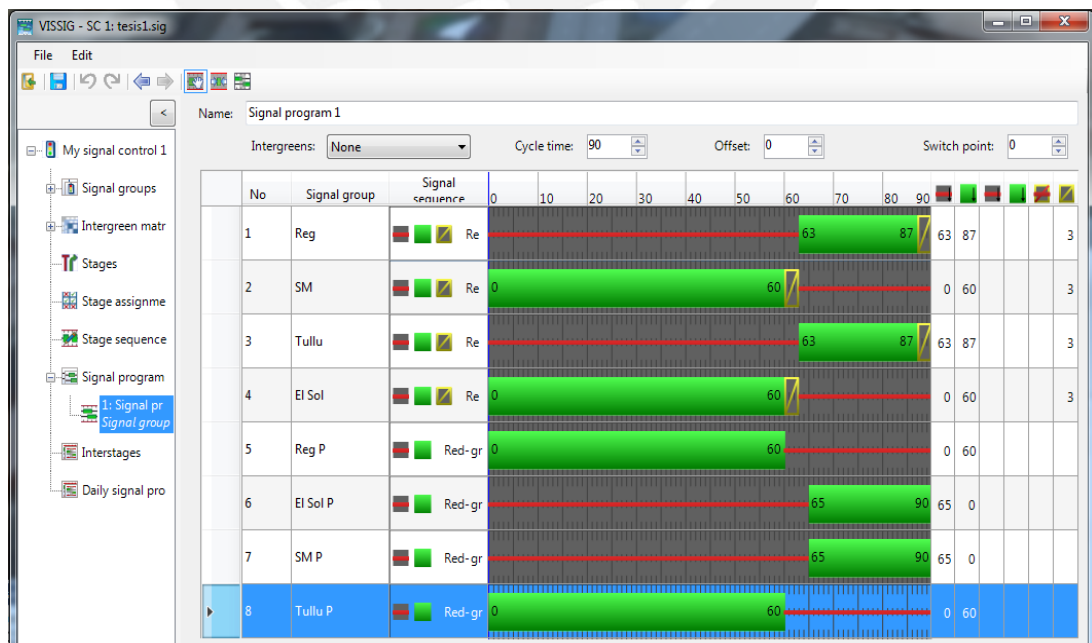


Figura 45. Fases y ciclos de los semáforos

Fuente: Elaboración propia



Los resultados que se obtuvieron para esta propuesta son los siguientes:

Las longitudes cola se redujeron considerablemente como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 17. Comparación de longitudes de cola

Vías	Situación actual	Mejoras aplicadas
	Longitud de cola (m)	Longitud de cola (m)
Av. San Martín	127	111
Av. Tulumayo	86	84
Av. El Sol	16	4
Calle Regional	63	60

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que la mayor reducción de longitud de cola se da en la Avenida San Martín. Lo cual es muy positivo; ya que esta vía presentaba mayor aglomeración de vehículos por las condiciones antes expuestas. Estos números reflejan un cambio notorio en cuanto a este parámetro se refiere y en general denotan una mejora en el funcionamiento de la intersección.

Por otra parte, la demora promedio se redujo de 39.27 segundos a 32.22 segundos. En otras palabras, se logró una reducción del 17.95 % (7.05 segundos). Por último, la velocidad promedio se incrementó en un 11.90 % de 21 km/h a 23 km/h.

### 6.3 Evaluación estadística de las propuestas de mejora

En esta sección del estudio, se determinará con ayuda de la estadística si los resultados de las mejoras propuestas establecen una diferencia notoria de mejoría comparados con los valores iniciales de longitudes de cola, demoras y velocidad promedio. Con este fin, se empleará la prueba de hipótesis al igual que en las etapas de calibración y validación mostradas anteriormente.

A continuación, se presentan las bases para el desarrollo de este análisis.

#### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ):  $u_1 = u_x$

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):  $u < u_x$  o  $u > u_x$

#### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

3) Gráfica y aceptación o rechazo de  $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$

➤ **Verificación de extremo positivo**

**Condiciones:**

$$H_0: u_1 = u_x; H_1: u_1 > u_x$$



Figura 46. Prueba de hipótesis para el extremo positivo

Fuente: Adaptado de [www.vitutor.net](http://www.vitutor.net) (2016)

➤ **Verificación de extremo negativo**

**Condiciones:**

$$H_0: u_1 = u_x; H_1: u_1 < u_x$$

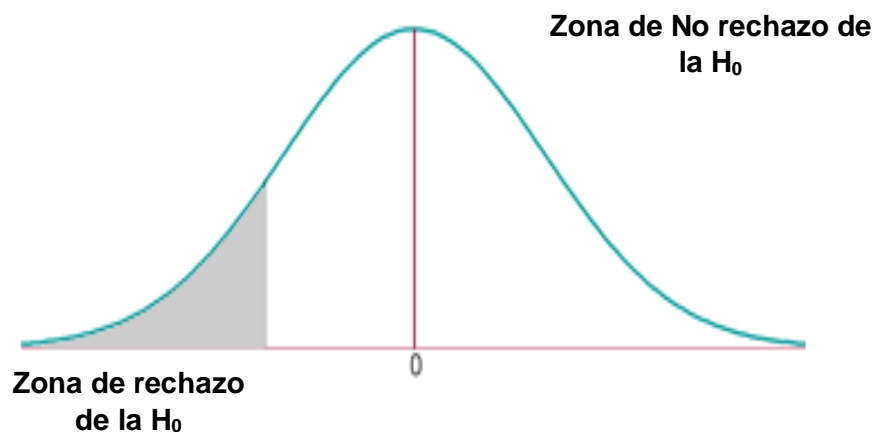


Figura 47. Prueba de hipótesis para el extremo negativo

Fuente: Adaptado de [www.vitutor.net](http://www.vitutor.net) (2016)

### 6.3.1 Evaluación de la Velocidad promedio

#### a) Propuesta de mejora desarrollada caso vehicular

##### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias de la propuesta ( $u_1$ ) y del modelo base ( $u_2$ ) son iguales ( $u_1=u_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $u_1 < u_2$   
o  $u_1 > u_2$

##### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

##### 3) Gráfica y aceptación o rechazo de $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

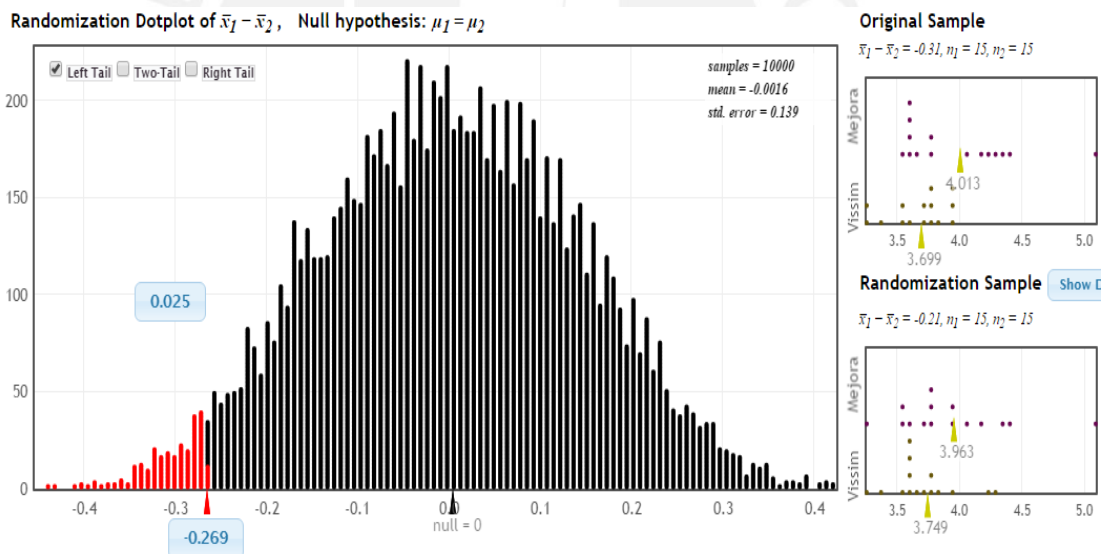


Figura 48. Diagrama de evaluación de la velocidad promedio

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la gráfica obtenida que la diferencia de medias se sitúa en la zona de rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ). Por lo que, esta no se acepta. Esto quiere decir que la mejora es notoria respecto a la situación inicial.

### 6.3.2 Evaluación de la Demora promedio

#### ➤ Propuesta de mejora desarrollada caso vehicular

##### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias de la propuesta ( $u_1$ ) y del modelo base ( $u_2$ ) son iguales ( $u_1=u_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $u_1 < u_2$  o  $u_1 > u_2$

##### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

##### 3) Gráfica y aceptación o rechazo de $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

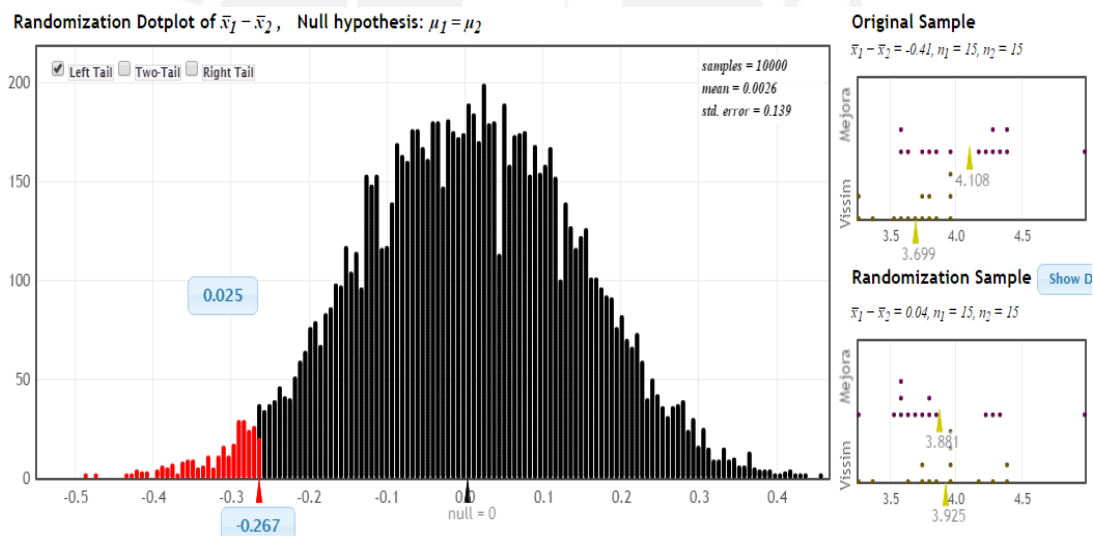


Figura 49. Diagrama de evaluación de la demora promedio vehicular

Fuente: Elaboración propia

Se puede corroborar, que la diferencia de medias se encuentra en la zona de rechazo de la hipótesis nula. Esto demuestra que no se acepta la hipótesis nula. Por lo que, la propuesta de mejora trabajada implica una mejoría importante en cuanto a la demora promedio inicial.

➤ **Propuesta de mejora desarrollada caso peatonal**

1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias del modelo base ( $\mu_1$ ) y de la propuesta ( $\mu_2$ ) son iguales ( $\mu_1 = \mu_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $\mu_1 < \mu_2$   
o  $\mu_1 > \mu_2$

2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

3) Gráfica y aceptación o rechazo de  $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

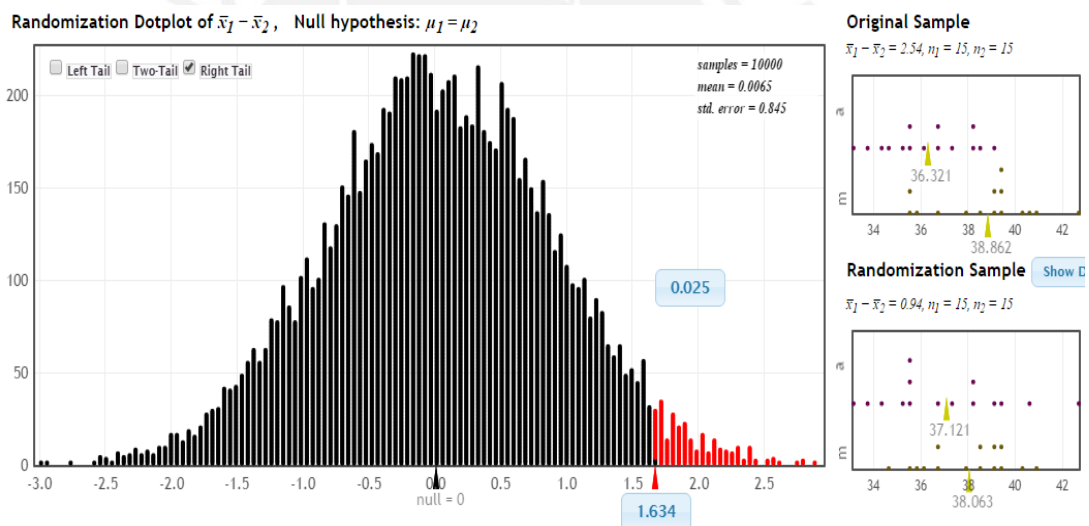


Figura 50. Diagrama de evaluación de la demora promedio peatonal

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la imagen 50, la diferencia de medias se encuentra en la zona de rechazo de la hipótesis nula. Esto significa que no se acepta la hipótesis nula. Por lo que, la propuesta de mejora trabajada implica una mejoría en cuanto a la demora promedio inicial.

### 6.3.3 Evaluación de las Longitudes de cola promedio

#### ➤ Propuesta de mejora desarrollada caso vehicular

#### Calle Regional

##### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias del modelo base ( $\mu_1$ ) y de la propuesta ( $\mu_2$ ) son iguales ( $\mu_1 = \mu_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $\mu_1 < \mu_2$  o  $\mu_1 > \mu_2$

##### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

##### 3) Gráfica y aceptación o rechazo de $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

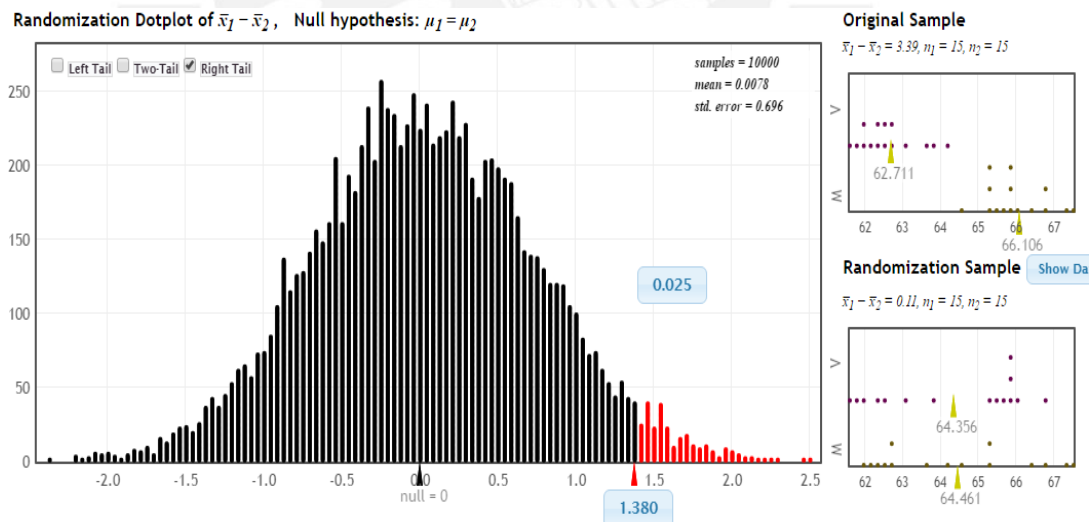


Figura 51. Diagrama de evaluación de la cola promedio Calle Regional

Fuente: Elaboración propia

## Avenida San Martin

### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias de la propuesta ( $u_1$ ) y del modelo base ( $u_2$ ) son iguales ( $u_1=u_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $u_1 < u_2$   
o  $u_1 > u_2$

### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

### 3) Gráfica y aceptación o rechazo de $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

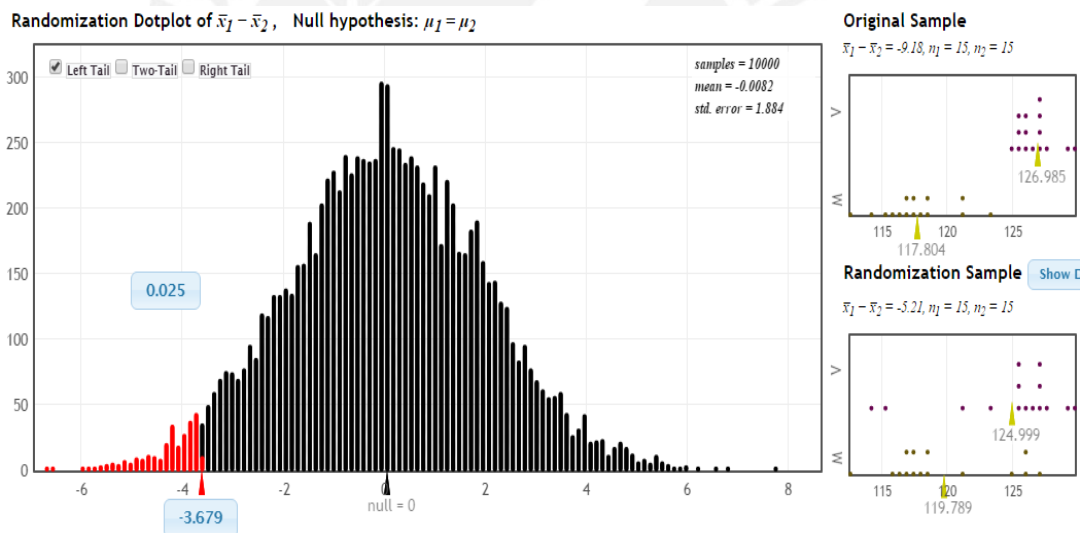


Figura 52. Diagrama de evaluación de la cola promedio Av. San Martin

Fuente: Elaboración propia

## Avenida El Sol

### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias de la propuesta ( $u_1$ ) y del modelo base ( $u_2$ ) son iguales ( $u_1=u_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $u_1 < u_2$   
o  $u_1 > u_2$

### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

### 3) Gráfica y aceptación o rechazo de $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

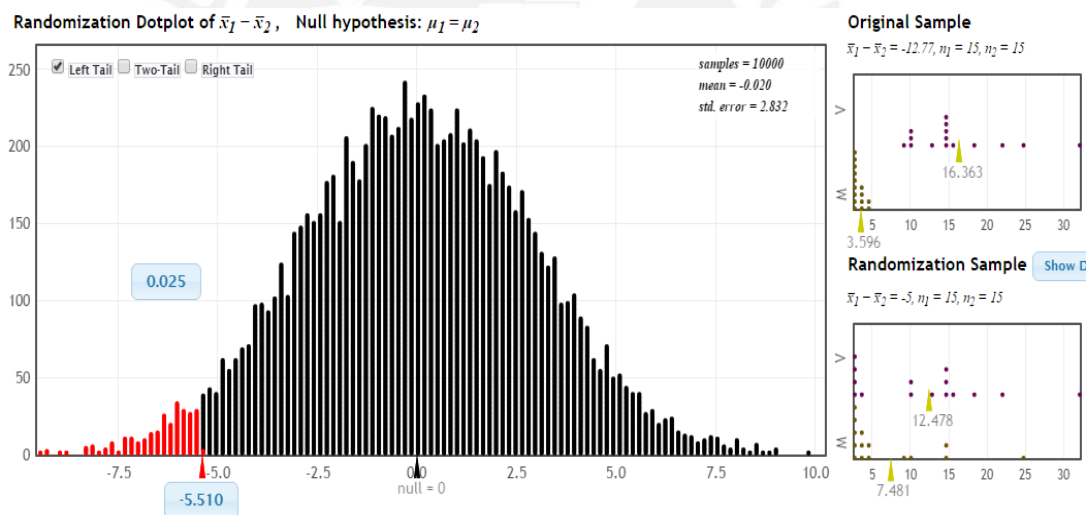


Figura 53. Diagrama de evaluación de la cola promedio Av. El Sol

Fuente: Elaboración propia



## Avenida Tullumayo

### 1) Planteamiento de Hipótesis:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): las medias de la propuesta ( $\mu_1$ ) y del modelo base ( $\mu_2$ ) son iguales ( $\mu_1 = \mu_2$ ).

Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Una de las medias es mayor o menor a la otra  $\mu_1 < \mu_2$  o  $\mu_1 > \mu_2$

### 2) Definir Significación

La significación que se usará es del 5% (confiabilidad del 95%)

### 3) Gráfica y aceptación o rechazo de $H_0$

Se extraerá la gráfica con ayuda del StatKey y se decidirá, dependiendo de los resultados obtenidos, si se acepta o rechaza la  $H_0$ .

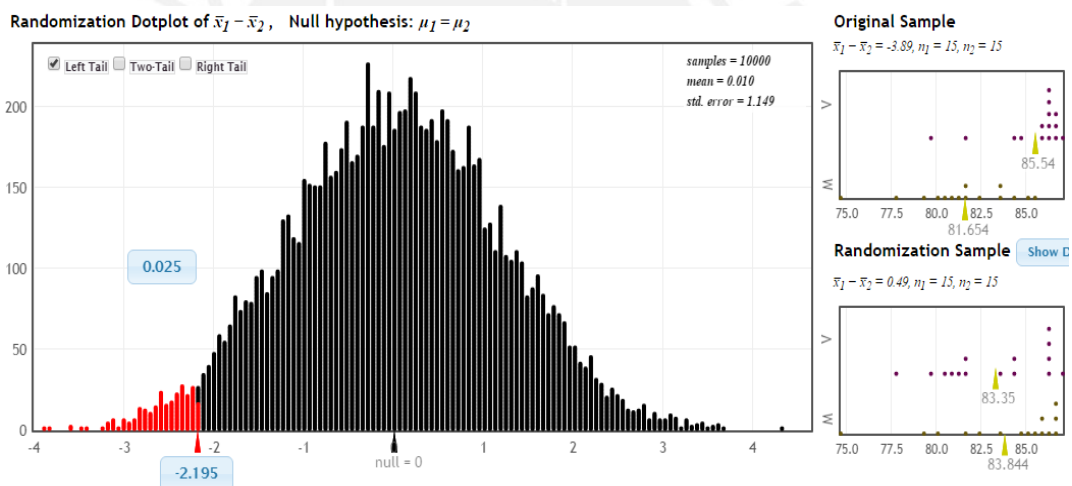


Figura 54. Diagrama de evaluación de la cola promedio Av. Tullumayo

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en cada caso, se aprecia que se rechaza la hipótesis nula. Lo que corrobora que la mejora desarrollada es significativa en cuanto al parámetro de longitud de cola analizado.

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se plantearon tres propuestas de mejora. Cada una de ellas con una distinción en la forma de lograr una solución a la situación actual de la intersección estudiada. Se eligió la tercera porque se contaba con todos los datos necesarios para realizar un correcto análisis de la misma, mientras que en las otras propuestas existía carencia de datos o limitaciones de espacio para desarrollarlas. Por otro lado, la modificación de la geometría que se propuso redujo la distancia, que recorren los vehículos para cruzar la intersección, en las Avenidas El Sol y Tullumayo en 3.1 m y 7.7 m respectivamente. Además de mejorar el tránsito vehicular, también se logró que la intersección sea más amigable para las personas discapacitadas y el público en general; ya que se mejoraron los accesos a las islas de protección de peatones para cruzar las avenidas y se colocó rampas de acceso a las veredas en todos los cruceos peatonales. Por lo que, se concluye que esta mejora no perjudicará a ningún tipo de usuario y por el contrario beneficia al usuario de a pie sin afectar negativamente al tráfico vehicular.

Por otra parte, de los resultados obtenidos del análisis de fases y ciclos de los semáforos se obtuvo que la idea inicial de mejora, que consistía en incluir 3 ciclos distintos a los semáforos de la intersección quedó descartada. Esto debido a que, al realizar la simulación con esta característica, se llegaba a resultados, por ejemplo, en las longitudes de cola, similares al modelo sin aplicar esta modificación. En algunos casos de variación de las fases, sentidos de carriles de la Calle Regional y del tiempo de los ciclos de los semáforos se obtenían incluso mayores longitudes de cola. Lo que reveló que esta idea no era la mejor opción. Debido a ello, se ejecutaron distintas combinaciones entre los casos expuestos y se obtuvo que el mantener dos ciclos, dar mayor tiempo de circulación a las Avenidas El Sol y San Martín e incrementar el tiempo de los ciclos de 70 a 90 segundos generaba una disminución notable en todos los parámetros de evaluación. La mejora más destacable se logró en la longitud de cola de la Avenida San Martín; ya que se redujo en 16 metros la longitud de la situación actual en la zona de estudio. Por lo tanto, se concluye que las modificaciones aplicadas marcan la diferencia destacadamente; ya que en esta vía es donde ocurre la mayor aglomeración de vehículos (longitud de cola). Por otra parte, en el caso peatonal se incrementó el tiempo de cruce en las vías de mayor afluencia de personas. Este es el caso del cruce de la Avenida Tullumayo, en el cual se brindó 24 segundos adicionales para el movimiento del usuario de a pie; ya que

este cruce conduce a un centro artesanal bastante concurrido. Este aumento de tiempo no perjudica al tránsito vehicular, dado que la reducción de distancia a recorrer en esta avenida (para los vehículos) con el fin de cruzar la intersección se redujo como se mencionó anteriormente. Asimismo, estos segundos extra asignados otorgarán mayor libertad de desplazamiento y comodidad al peatón; dado que el promedio de demora en cruzar esta conexión, antes de aplicar las mejoras, era demasiado ajustado al tiempo que se les brindaba a los usuarios de a pie para llegar a su destino.

Se destaca que es de gran importancia la recolección de datos de campo; ya que estos representan la base del análisis a realizar. Si se tuviera fallos o malinterpretaciones de estos datos la evaluación de la zona de estudio puede llegar a ser completamente diferente a la situación real. Por lo tanto, es recomendable realizar la toma de datos con el soporte de personas con experiencia y con conocimientos del tema.

En cuanto a la capacidad de reflejar la realidad que posee los software empleados, es de alta calidad y precisión; ya que cuando se calibró el modelo desarrollado los resultados que se obtuvieron de los distintos parámetros de evaluación (tiempo de viaje, longitudes de cola, entre otros) presentaron una afinidad a los datos recogidos asombrosa.

Por último, cabe recalcar que las mejoras logradas están dedicadas, exclusivamente, para la época del año en la cual se realizó la recolección de datos; ya que el comportamiento del tráfico, tanto vehicular como peatonal, varía conforme el tiempo transcurre.

## **REFERENCIAS**

- Aguirre, M. (2015). *Sistemas, modelos y simulación* [Fecha de consulta: 25 de abril] Recuperado de: <http://arantxa.ii.uam.es/~aguirre/OS/sms.pdf>
- Ahmed, K (1999). *Modeling Driver's Acceleration and Lane Changing Behavior*. Massachusetts: Institute of Thecnology.
- Alcalá, M. (2016). *Micro simulación del tráfico de la intersección de las avenidas Bolívar, Córdova y calle Andalucía empleando el software Vissim 6*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Arrieta, K. (2013). *Modelación del tráfico vehicular con el software PTV Vissim tramo bomba El Gallo- bomba el Amparo*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Boxill, S. & Yu, L. (2000). *An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development*. Houston: Texas Southern University.
- Bloomberg, L.& Dale, J. (2000). *A comparison of the Vissim and Corsin traffic simulation models*. Oakland: Institute of Transportation Engineers Annual Meeting.
- Cabrera, F. (2015-A). *Gestión del tránsito*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Cabrera, F. (2015-B). *Ingeniería del tráfico*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chávez, M (2012). *Simulación de sistemas*. [Fecha de consulta: 4 de mayo]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/116361993/simulacion-de-sistemas>
- Dowling, R., Skabardonis, A., Halkias, J., McHale, G., & Zammit, G. (2004). Guidelines for calibration of microsimulation models: framework and applications. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1876), 1-9.
- Fellendorf, M. & Vortisch, P. (2010). *Microscopic traffic flow simulator Vissim*. Alemania: International Series in Operation Research and Management Science.
- Fernández, P. (2015). Determinación del tamaño muestral. [Fecha de consulta: 15 de mayo]. Recuperado de: <http://www.fisterra.com/mbe/investiga/9muestras/9muestras2.asp>
- Fernández, R. (2009). *Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular*. Santiago de Chile: Universidad los Andes.

- FHWA (2004). *Traffic analysis toolbox Volume II: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software*. Washington: FHWA-HRT-04-040.
- Friss, C. & Svensson L, (2013). *Pedestrian Simulation: A comparative study between the software programs Vissim and Viswalk*. Gothenburg: Chalmers University Of Technology.
- Gallardo, J (2011). *Modelos de simulación*. [Fecha de consulta: 4 de mayo]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/59825248/Modelos-de-simulacion>
- Gómez, A. (2005). *El estado del arte en la modelación de problemas de tránsito*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Holgado, E. (2012). *Estudio de regulación del tránsito de vehículos y peatones en los alrededores de la avenida Portugal de Salamanca*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Narváez, R. & Zapardiel, A. (2015). *Modelación del tránsito vehicular en el sector bomba El Ampari-Sao la Plazuela, Cartagena por medio del software PTV Vissim*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- NSW Roads & Maritime Services (2013). *Traffic Modelling Guidelines*. New South Wales Version: 1.0
- Papageorgiou G. (2006). *Towards a microscopic simulation model for traffic management: A computer-based Approach*. Cyprus: University of Cyprus.
- Papathanasopoulou V. & Antoniou C. (2015). Towards data-driven car-following models Transportation Research Part C: Emerg. Technol., 55 (2015), pp. 496–509
- Pimentel, J. (2014). *Modelo determinístico y probabilístico para la escala de medición de personas* [Fecha de consulta: 4 de mayo]. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/angelfarrugia/deterministico-y-probabilistico-36982154>
- Prócer, C. (2015) *Sistemas de Transporte Inteligente 09 | Necesidad de los ITS | Modelos de la General Motors* [Fecha de consulta: 17 de mayo]. Recuperado de: <http://www.tresingenieros.com/sistemas-de-transporte-inteligente-09-necesidad-de-los-its-modelos-de-la-general-motors/>
- PTV GROUP (2016). *Welcome to PTV Group! – PTV Group* [Fecha de consulta: 16 de mayo]. Recuperado de: <https://www.ptvgroup.com>
- Pursula, M. (1999). *Simulation of Traffic Systems*. Otaniemi: Helsinki University of Technology.

Salvador, I. & Robusté, L. (2000). *Principios para la micro-simulación del tráfico*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Schmidt & Taylor (1970). *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. Homewood, Illinois: Richard D. Irwin.

Siddharth S. & Gitakrishnan R. (2013). *Calibration of VISSIM for Indian Heterogeneous Traffic Conditions*. Chennai: Department of Civil Engineering.

Suarez, A. (2007). *Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante la micro-simulación*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Vico, F., Basagoiti, F., Lobo, D. & García-Platas, R. (2014). *Modelado y simulación del tráfico en vías urbanas y periurbanas en base a la estimación de tiempos de recorrido*. Málaga: Universidad de Málaga.

Weinstein MC, O'Brien B, Hornberger J. (2003). Principles of good practice of decision analytic modeling in health care evaluation: Report of the ISPOR Task Force on Good Research Practices-Modeling Studies. *Value Health* 2003; 6

