



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

“REPROGRAMACIÓN DE SEMÁFOROS USANDO PROMODEL PARA DISMINUIR LA CONGESTIÓN VEHICULAR EN UNA VIA SEMAFORIZADA EN LA CIUDAD DE CAJAMARCA”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor:

Bachiller Juan Diego León Quevedo

Asesor:

MBA. Ing. Mylena Karen Vílchez Torres

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

Dedicado a mi amada esposa Ariany, a mi
hija Camila, a mis padres (Roy y Ceci) y
a mis hermanos.

En especial a Héctor Nicanor León. A ti,
Niquito.

AGRADECIMIENTO

Al Padre Celestial, primeramente.
A mi familia, mis amigos y los profesores de
universidad, que me ayudaron y siguen
ayudándome a crecer como persona.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
INDICE DE TABLAS.....	6
INDICE DE FIGURAS	7
INDÍCE DE ECUACIONES	8
RESUMEN.....	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Realidad Problemática.....	10
1.2. Formulación del Problema.....	13
1.3. Objetivos.....	13
1.3.1. Objetivo General.....	13
1.3.2. Objetivos Específicos	13
1.4. Hipótesis.....	14
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	14
2.1. Tipo de investigación.....	14
2.2. Metodología seguida.....	14
2.2.1. Metodología para modelar y analizar la situación real	15
2.2.1.1. Esquema Base	15
2.2.1.2. Aspectos Generales.....	15
2.2.1.3. Modelado en ProModel	19
2.2.1.4. Validación.....	26
2.2.2. Metodología para desarrollar y correr la simulación de los escenarios de reprogramación de semáforos.....	26
2.2.3. Metodología para analizar los resultados de los nuevos escenarios simulados en relación con el congestionamiento vehicular.....	27
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.	28
2.4. Procedimiento.....	29
2.5. Matriz de consistencia.	31
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	33
3.1. Modelado y análisis de la situación actual.	33
3.1.1. Esquema para realizar el modelado.....	33
3.1.2. Modelado en ProModel.....	35

3.1.2.1.	Locaciones.....	40
3.1.2.2.	Entidades.....	44
3.1.2.3.	Arribos.....	45
3.1.2.4.	Procesos.....	46
3.1.2.5.	Atributos.....	51
3.1.2.6.	Variable de Conteo.....	53
3.2.	Diagnóstico actual.....	56
3.2.1.	Indicadores para las calles.....	57
3.2.2.	Validación.....	58
3.2.3.	Indicadores para los semáforos.....	59
3.2.4.	Indicadores para los automóviles.....	62
3.2.5.	Indicadores para la variable de conteo.....	65
3.3.	Desarrollar y correr la simulación de los escenarios propuestos para la reprogramación del tiempo de los semáforos.....	67
3.3.1.	Primer escenario.....	68
3.3.1.1.	Indicadores para las calles – Escenario propuesto 1.....	73
3.3.1.2.	Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 1.....	74
3.3.1.3.	Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 1.....	77
3.3.1.4.	Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 1.....	79
3.3.2.	Segundo escenario.....	80
3.3.2.1.	Indicadores para las calles – Escenario propuesto 2.....	83
3.3.2.2.	Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 2.....	84
3.3.2.3.	Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 2.....	86
3.3.2.4.	Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 2.....	87
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		90
REFERENCIAS		93
ANEXOS.....		96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones de un automóvil tipo Sedán.....	18
Tabla 2 Límites de velocidad para zonas urbanas	19
Tabla 3 Validación del modelo de simulación	26
Tabla 4: Técnicas e instrumentos de investigación	28
Tabla 5: Validación del instrumento	28
Tabla 6 Matriz de Consistencia	31
Tabla 7: Calles y Semáforos a modelar	37
Tabla 8: Longitud y capacidad de cada calle.....	40
Tabla 9: Ciclos de los semáforos.....	41
Tabla 10: Desfases entre los semáforos.....	42
Tabla 11 Tiempos de interllegada	45
Tabla 12 Salidas por cada semáforo	48
Tabla 13 Proceso de ruteo para el modelado.....	49
Tabla 14: Indicadores de la situación actual - Calles	57
Tabla 15: Validación del modelado con respecto a las colas	58
Tabla 16: Indicadores para los semáforos	59
Tabla 17: Indicadores para los automóviles	63
Tabla 18: Porcentajes de operación para el indicador de automóviles.....	64
Tabla 19: Tiempo ideal de recorrido completo por automóvil.....	65
Tabla 20: Indicadores de las variables de conteo	66
Tabla 21: Información para el primer escenario propuesto.....	69
Tabla 22: Tiempo de ciclo de los semáforos - Escenario propuesto 1	71
Tabla 23: Tiempo de desfase de los semáforos - Escenario propuesto 1	72
Tabla 24: Indicadores para las calles - Escenario propuesto 1	73
Tabla 25 Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 1	75
Tabla 26: Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 1.....	77
Tabla 27: Porcentajes de operación para los automóviles - Escenario propuesto 1	78
Tabla 28: Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 1.....	79
Tabla 29: Tiempo de ciclo de los semáforos - Escenario propuesto 2	81
Tabla 30: Tiempo de recorrido en los tramos principales	82
Tabla 31: Tiempos de desfase - Escenario propuesto 2.....	82
Tabla 32: Indicadores para las calles – Escenario propuesto 2	83
Tabla 33: Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 2.....	85
Tabla 34: Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 2.....	86
Tabla 35: Porcentajes de operación para los automóviles - Escenario propuesto 1	87
Tabla 36: Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 2.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema base del sistema vial	15
Figura 2: Consideración del ciclo de los semáforos	16
Figura 3: Desfase entre semáforos.....	17
Figura 4: Espacio ocupado por un automóvil.....	18
Figura 5: Herramientas utilizadas en ProModel	19
Figura 6: Tiempo muertos por Reloj en ProModel.....	21
Figura 7: Tiempos muertos por reloj	22
Figura 8 Indicadores de los Semáforos	22
Figura 9: Encabezados para ruteo.....	24
Figura 10: Propuesta de escenarios de mejora.....	27
Figura 11 Mapa de las calles a utilizar en la investigación	35
Figura 12 Esquemas de las calles para modelar en ProModel	36
Figura 13: Primera prueba en ProModel.	38
Figura 14 Modelado preliminar de las locaciones.....	39
Figura 15: Modelado de los tiempos de los semáforos.	43
Figura 16: Locaciones del modelo.	44
Figura 17 Entidades del modelo	45
Figura 18 Modelado de los arribos	46
Figura 19 Modelo preliminar con ruteo.....	47
Figura 20: Modelado de atributos.....	51
Figura 21 Programación de los atributos.....	52
Figura 22: Modelado de variables.	53
Figura 23: Modelo preliminar con variables.	54
Figura 24 Programación de las variables.....	56
Figura 25 Indicadores de los semáforos	61
Figura 26 Comportamiento del sistema para la primera propuesta.....	68
Figura 27 Esquema de la "Ola Verde"	80

INDÍCE DE ECUACIONES

Ecuación 1	20
Ecuación 2	21
Ecuación 3	55
Ecuación 4	81

RESUMEN

Existen diferentes tipos de soluciones para problemas cotidianos como lo es la congestión vehicular, que aumenta cada vez más. El incremento del parque automotriz y su uso excesivo, en muchas ocasiones exceden la capacidad de las calles de las vías públicas, y el resultado de esto, son indicadores de congestión elevados. La investigación propone el uso de la investigación de operaciones, específicamente la simulación, para tratar de dar solución a un problema de congestionamiento vehicular en algunas calles del centro de la ciudad de Cajamarca, ya que en un entorno controlado como un simulador se puede proponer cambios en el sistema y ver cuáles son los resultados, evitando el impacto de hacer pruebas de manera directa que puedan resultar perjudiciales. Mediante la observación directa se hizo la toma de datos, luego se realizó la corrida en ProModel y se propuso dos escenarios analizando la situación actual del sistema. El resultado más relevante fue la reducción del tiempo máximo que le toma a un automóvil recorrer todo el sistema, que en un inicio fue de 10 minutos y con la mejora se redujo a 4.4 minutos. La simulación resulta ser una herramienta efectiva y se puede aplicar a varios escenarios.

Palabras clave: Simulación, semáforos, congestión vehicular, ProModel, reprogramación.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática.

Existen diversos problemas que en la actualidad se buscan solucionar de formas eficientes y rápidas. Gracias a la simulación se puede probar las posibles soluciones en un entorno que no requiera una alta inversión y donde el riesgo sea mínimo. Por ejemplo, se sabe que la ingeniería utilizada para el vuelo de un avión es sumamente compleja y costosa, y para lanzar un nuevo diseño se tiene algunas alternativas para hacer pruebas antes del lanzamiento final, una de ellas son las pruebas teóricas que con un adecuado análisis de las leyes físicas se puede obtener información de los cambios en el desempeño del avión, otra es construir aviones reales y probarlos en vuelos reales, lo que generaría costos demasiado elevados y con un riesgo muy alto. Es por esta razón que se han creado túneles de viento, para poder simular el vuelo de un avión real en un medio controlado con el fin de estimar cuál sería su desempeño real. (Hillier & Lieberman, 2010).

Para la investigación de operaciones (IO), la simulación es una de las técnicas más utilizadas dado que es una herramienta flexible, poderosa e intuitiva, y sus aplicaciones crecen cada día más (Hillier & Lieberman, 2010). Como herramienta de investigación, permite construir un modelo que imita el argumento real del problema y se usa para saber de qué manera se comportaría el sistema, formulando preguntas condicionantes como “¿Qué pasaría si...?” (Mathur, 1996); por tanto, se basa esencialmente en dar entradas a un modelo y configurarlo en distintos escenarios, para finalmente estudiar las respuestas y predecir lo que puede suceder en la realidad (Urquía & Martín, 2002). A pesar de no ser una técnica de optimización, la simulación permite determinar las

medidas de desempeño en un sistema (Taha, 2012). Los pasos básicos para hacer simulación son definir el sistema bajo estudio, recolectar y analizar los datos, generar el modelo preliminar, validación del modelo, generación del modelo final, proponer escenarios de mejora y probarlos, y finalmente dar recomendaciones (García, García & Cárdenas, 2013). El método Monte Carlo es uno de los más usados en simulación, consiste en la transformación de números aleatorios en un valor correspondiente de la variable deseada y a pesar de que es un método manual, sentó las bases de la simulación por computadora. (Gallagher & Watson, 1982)

Una aplicación común de la simulación es en problemas de líneas de espera o colas; la teoría de colas se ocupa de las llegadas de elementos a una instalación de servicio, tiene que ver con el fenómeno de esperar y la cuantificación de los factores involucrados a través de medidas de rendimiento como el tiempo promedio en el sistema, tiempo de espera, tiempo de servicio, la longitud de cola, porcentaje de utilización y el uso promedio de la instalación, entre otros (Taha, 2012) (Hillier & Lieberman, 2010) (Peraza, 2013). Su objetivo principal es la minimización del tiempo de espera y de costos de funcionamiento (Amaya, 2009); y se apoya en la simulación para hacer el estudio más práctico y preciso (Gonzales & García, 2015). Como todo método o teoría, la teoría de colas cuenta con un proceso básico; primero, los elementos que llegan al sistema se generan a través del tiempo en una fuente de entrada, se utiliza la letra griega lambda (λ) para definir el promedio de llegadas por unidad de tiempo, estas interllegadas pueden ser de distribución exponencial, esto sucede cuando la ocurrencia de un evento es independiente del tiempo transcurrido desde la ocurrencia del último evento (Taha, 2012) (Mathur, 1996); segundo, los elementos se unen a la cola; tercero, se selecciona a los elementos para que reciban el

servicio; cuarto, el mecanismo de servicio atiende a los elementos; y quinto, terminado el servicio, el elemento sale del sistema (Amaya, 2009).

Con el pasar del tiempo, se han ido desarrollando paquetes de programas que permiten hacer simulaciones por computadora, ProModel [Software] es uno de los programas por computadora que cuenta con herramientas de análisis y diseño que permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables (García et al., 2013).

En el estudio realizado por Paredes & Tirado (2016), a través de la IO, se estudió la demanda de una línea de transporte para reducir la capacidad ociosa y ajustar el número de unidades a la demanda real. Así mismo, Díaz & Arribasplata (2016) realizaron un estudio en el que demostraron que a través de la simulación se pudo resolver un problema simple, pero de gran repercusión, como son las colas que se forman para esperar atención en los hospitales.

La investigación aborda el análisis y evaluación de la simulación para resolver un caso en particular que de otra forma podría conllevar el uso innecesario de recursos, tales como el tiempo, dinero, espacio, etc. Actualmente el congestionamiento vehicular en las zonas urbanas es un problema que va en aumento, y las redes de semáforos juegan un papel importante para evitarlo o, con un efecto contrario al buscado, agrandar este problema. Con la programación de semáforos se busca dar solución a varios aspectos, entre ellos la cantidad de carros en cola, los tiempos de inactividad de los semáforos, el tiempo de permanencia de los automóviles en una calle o en todo el sistema, la utilización de las calles, etc. Y esto, a su vez repercutirá en otros factores como reducir demoras, emisión de contaminantes, uso de combustible, etc. (Lema, Pedreira, Bouza

& Allende, 2009). Para dar alguna solución a esta problemática se podrían realizar pruebas incluso de forma real, probando cuáles son los mejores tiempos para cada semáforo, y validando de forma directa en las calles si los cambios son para bien o para mal, lo que generaría gran incomodidad en los usuarios. Por tal razón, la investigación propone imitar el comportamiento del sistema vial en un programa de simulación para poder proponer mejoras, reduciendo los riesgos de hacer pruebas de *in situ*.

1.2. Formulación del Problema.

¿En qué medida la reprogramación de semáforos usando ProModel disminuye la congestión vehicular en una vía semaforizada en la ciudad de Cajamarca?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Simular la reprogramación de semáforos usando ProModel para disminuir la congestión vehicular en una vía semaforizada en la ciudad de Cajamarca.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Modelar y analizar la situación inicial.
- Desarrollar y correr la simulación de los escenarios de reprogramación de los semáforos.
- Analizar los resultados de los nuevos escenarios simulados en relación con el congestionamiento vehicular.

1.4. Hipótesis.

La reprogramación de los semáforos usando ProModel disminuirá la congestión vehicular en una vía semaforizada en la ciudad de Cajamarca.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación.

Según su propósito, es aplicada. La tesis se centra en aplicar la simulación como herramienta.

Según su profundidad, es correlacional. Se evalúa la relación entre las variables que intervengan en el diseño.

Según la naturaleza de los datos, es cuantitativa. Se analiza los indicadores para dar respuesta a los objetivos.

Según su manipulación de variable, es cuasi experimental.

2.2. Metodología seguida

En su mayoría, los estudios basados en técnicas de IO se desarrollan siguiendo secuencias de pasos. La simulación, como herramienta, cuenta con una serie de pasos básicos que ayudan al correcto modelado del sistema, y a que se acerque lo más posible a la realidad, para así poder tener resultados reales al momento de proponer escenarios (Hillier y Lieberman, 2010).

2.2.1. Metodología para modelar y analizar la situación real

2.2.1.1. Esquema Base

Un sistema vial cuenta con semáforos situados de manera continua en una calle principal e intersecciones semaforizadas que regulan la entrada y salida de automóviles. La Figura 1 representa, básicamente, el esquema que se utilizó para modelar el sistema en ProModel, con la calle principal y las intersecciones semaforizadas:

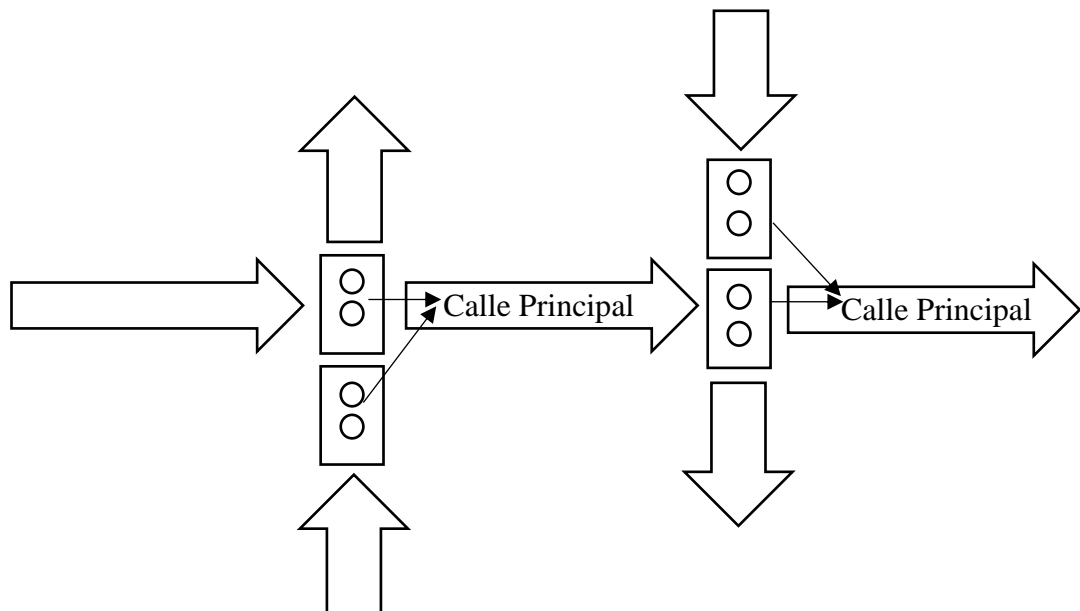


Figura 1: Esquema base del sistema vial

El esquema representado cuenta con una calle principal la cual es alimentada por, lo que en adelante llamaremos, las calles alimentadoras.

2.2.1.2. Aspectos Generales

Para poder hacer la simulación del movimiento que realizan los automóviles en las calles, se tuvo que considerar los siguientes aspectos o características generales para los diferentes datos que fueron tomados a través de observación directa.

- Interlegadas: La interlegada de un vehículo al sistema se define como el lapso que transcurre entre la llegada de uno y otro.

ProModel requiere un número exacto de interlegada para cada entidad que se use en el sistema. Entonces, para poder modelar esta característica se hizo la toma de datos respectiva y se sacó un promedio. Sólo se tomó en cuenta la interlegada de aquellos vehículos que ingresan a las calles alimentadoras. No se consideró la de la calle principal ya que esta depende de la de las calles alimentadoras y del paso que permitan los semáforos.

- Ciclo de los semáforos: El ciclo de un semáforo se define como el lapso en el que transcurren todas las fases o colores.

A pesar de que el semáforo cuenta con tres fases (ámbar, verde y rojo), para más practicidad al momento del modelado y dado que la fase ámbar es muy rápida y no influye mucho, se la consideró la fase verde, como figura en el ejemplo de la Figura 2:

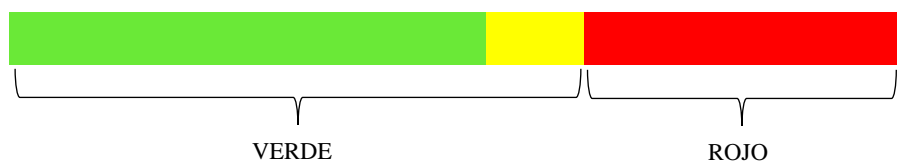


Figura 2: Consideración del ciclo de los semáforos

Como sabemos, la fase verde permite el paso de los vehículos, y la fase roja los detiene.

El desfase entre semáforos también fue un aspecto importante a tomar en cuenta para la modelación, en este caso los desfases entre un semáforo y otro se midieron por el tiempo de diferencia entre el inicio de sus ciclos, como se muestra en la Figura 3.

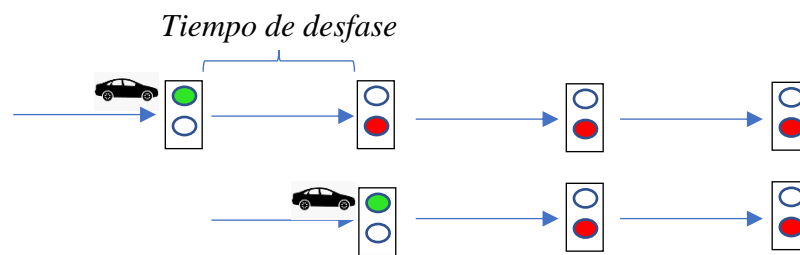


Figura 3: Desfase entre semáforos

- Salidas: Así como el sistema cuenta con entradas de automóviles en las calles alimentadoras, también existen salidas por donde los conductores pueden decidir abandonar en el sistema.

ProModel cuenta con una herramienta que permite modelar el porcentaje de salidas o abandonos, en este caso cada semáforo contó con esta característica que permitió colocar, en porcentaje, cuántos automóviles abandonan el sistema antes de llegar a la última calle.

- Dimensiones de los automóviles: Para fines prácticos, la longitud se tomó de la de un automóvil tipo Sedán, ya que es el tipo de auto más común. No todos los sedanes tienen exactamente las mismas dimensiones, esto depende en gran medida del modelo y la marca del auto, por tanto, se hizo un promedio y la Tabla 1 muestra las dimensiones obtenidas:

Tabla 1: Dimensiones de un automóvil tipo Sedán.

ALTO	ANCHO	LARGO
1.5	1.2	4.5

Fuente: Elaboración propia.

Se consideró una distancia prudente de un metro entre un automóvil y otro, esto ya que al hacer la toma de datos se evidenció que en promedio esta es la distancia que un automóvil deja como separación con respecto al siguiente en la cola. La Figura 4 muestra este cálculo:

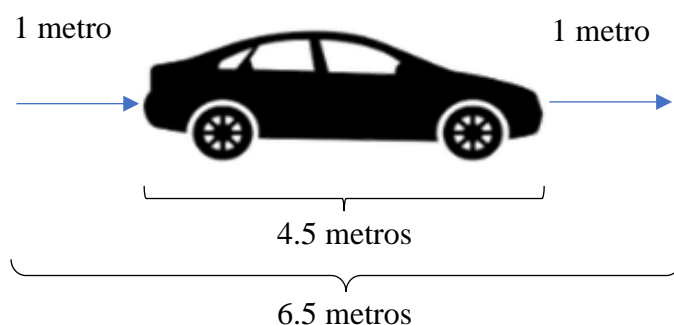


Figura 4: Espacio ocupado por un automóvil.

- Velocidad de los automóviles: Otro aspecto que se tomó en cuenta para los automóviles fue su velocidad. Dado que la investigación también estuvo direccionada a reducir tiempos de recorrido en el sistema, la velocidad sí fue un aspecto influyente por lo que fue necesario modelar este dato y no permitir que por defecto el programe lo asigne.

Gracias a la observación directa se evidenció que en las horas punta, y debido al tráfico, la mayoría de automóviles van a una velocidad un poco por debajo del límite reglamentario para calles y jirones que es 20 km/h (Reglamento Nacional de Tránsito – Perú, 2014), la Tabla 2 muestra los límites de velocidad:

Tabla 2 Límites de velocidad para zonas urbanas

Tipo de vía	Velocidad máxima	Velocidad mínima
Calles y Jirones	40 km/h	20 km/h
Avenidas	60 km/h	30 km/h
Vías expresas	80 km/h	40 km/h
Zona escolar	30 km/h	15 km/h
Zona de hospital	30 km/h	15 km/h

Fuente: Elaboración propia

Se decidió modelar la velocidad para todos los automóviles respetando el límite mínimo establecido por ley.

2.2.1.3. Modelado en ProModel

Como se explicó anteriormente, el programa por computadora utilizado para hacer el modelo de simulación fue ProModel [Software]. Para desarrollar el modelo se determinó los siguientes comandos en la pestaña “Construir”, como se muestra en la Figura 5:








Construir	Simulación	Output	Herrami
	Locaciones		Ctrl+L
	Entidades		Ctrl+E
	Procesos		Ctrl+P
	Arribos		Ctrl+I
	Atributos		Ctrl+T
	Variables (global)		Ctrl+B
	Información General		

Figura 5: Herramientas utilizadas en ProModel

- **Locaciones.** Este comando permite modelar las características de una ubicación o estación de trabajo donde se lleve a cabo una operación o proceso, su función

es alojar a los elementos del modelado (García et al, 2013). Para la investigación se consideró las siguientes:

○ **Calles.**

Para el sistema, las calles fueron la locación necesaria para modelar las colas de automóviles que se formarían en la simulación. Se tomó en cuenta la capacidad exacta sólo de las calles principales.

Esta capacidad se calculó con la longitud de cada calle y la de los automóviles.

Ecuación 1

$$\text{Capacidad de la calle} = \frac{\text{Longitud de la calle}}{\text{Espacio que ocupa un automóvil}} \quad (1)$$

Para las calles alimentadoras se consideró una capacidad igual para todas, esto ya que el número de carros en cola puede estar por encima de la capacidad real de la calle y pasar a la siguiente, situación que sucede con frecuencia en un sistema vial con gran congestión vehicular.

▪ **Indicadores de la locación Calles:** Esta locación permitió obtener los siguientes indicadores para la investigación (García et al, 2013):

- Contenido promedio. Número promedio de automóviles en la locación, es decir el promedio de cola.
- Tiempo por entrada promedio. Tiempo promedio de permanencia en la locación, es decir el tiempo que permanece un automóvil en una calle específica.
- Porcentaje de utilización. Es el resultado de la Ecuación 2:

Ecuación 2

$$\text{Porcentaje de utilización} = \frac{\text{Contenido promedio}}{\text{Capacidad de la locación}} \quad (2)$$

○ **Semáforos.**

Para el modelo, los semáforos son locaciones al final de cada calle que permite el paso o no de los vehículos. Se tuvieron que programar dos tiempos, el ciclo y el desfase.

ProModel cuenta con una herramienta llamada “Tiempos Muertos por Reloj”, la que permitió programar el tiempo de ciclo y desfase en cada semáforo. La Figura 6 muestra los datos requeridos para dicha programación:

Tiempos Muertos por Reloj [1]				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...

Figura 6: Tiempo muertos por Reloj en ProModel.

- 1.- Frecuencia. Es el tiempo de ciclo de cada semáforo.
- 2.- Primera vez. Aquí se programa en cuánto tiempo será el primer tiempo muerto. En esta pestaña irá el tiempo de desfase de los semáforos respecto a un tiempo inicial cero.
- 3.- Prioridad. Por defecto es 99.
- 4.- Programado. Para indicar sí estará programada la detención durante la simulación.
- 5.- Lógica. Se coloca el tiempo que durará el tiempo muerto. Es decir, el tiempo de fase rojo.

La Figura 7 muestra cómo se relacionan estos tiempos en el modelado.

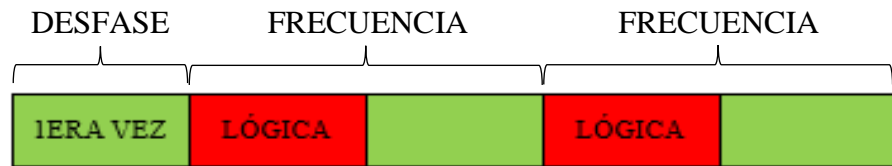


Figura 7: Tiempos muertos por reloj

- **Indicadores de la locación Semáforos:** Esta locación permitió obtener los siguientes indicadores para la investigación (García et al, 2013):

- Porcentaje de operación. Es el porcentaje de tiempo que una locación estuvo operando.
- Porcentaje inactivo. Es el porcentaje de tiempo que una locación estuvo ociosa por falta de entidades.
- Porcentaje bloqueado. Porcentaje de tiempo que las entidades estuvieron bloqueadas en la locación.

Estos tres porcentajes representan el total del tiempo simulado, como muestra la Figura 8:



Figura 8 Indicadores de los Semáforos

- **Entidades.** Las entidades son la representación gráfica de los flujos de entrada y salida en un sistema (García et al, 2013).
 - **Automóviles.** Se consideró a los automóviles como una entidad dado que son los elementos gráficos que recorren todo el sistema.

Para mejorar la visualización de la simulación, se identificó a los automóviles de cada calle con un color diferente.

Es en este comando donde ProModel requiere colocar la velocidad, la cual fue la misma para cada automóvil independientemente de la calle a la cual ingresó.

- **Indicadores para la entidad Automóviles.** ProModel toma en cuenta todos los automóviles que participaron en el sistema, eso significa que los indicadores para este comando incluyen tanto a automóviles que sólo transitaron por una calle y abandonaron, como a aquellos que llegaron a la última y completaron el recorrido. Estos son:
 - Tiempo en sistema promedio. Es el promedio de tiempo que permanece un automóvil en el sistema, habiendo terminado o no el recorrido.
 - Tiempo en operación promedio. Es el tiempo promedio que un automóvil estuvo en movimiento.
 - Tiempo detenido promedio. Es el tiempo que un automóvil no estuvo en movimiento.

- **Procesos.** Este comando se utilizó para definir las rutas que tomarían los automóviles en el sistema, tal como se graficó en la Figura 1. También se modeló los porcentajes de salidas para cada calle.

En la Figura 9 se puede apreciar los encabezados requeridos para poder hacer un adecuado ruteo y programación.

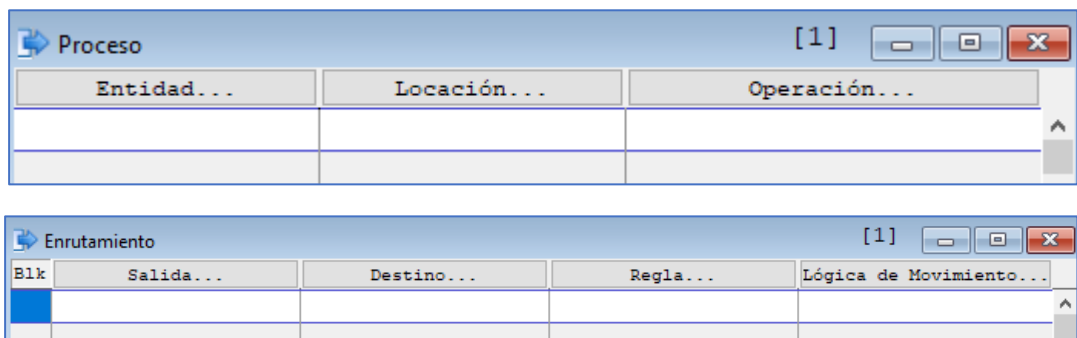


Figura 9: Encabezados para ruteo.

De acuerdo con lo presentado en la Figura 9, se programó la información para el ruteo de acuerdo con los encabezados, de la siguiente manera:

1. Entidad. Se coloca la entidad que va a ingresar al sistema.
2. Locación: Se coloca la locación por la cual va a ingresar la entidad.
3. Operación: Se indica el proceso que hará la locación a la entidad.
4. Salida. Se indica qué entidades saldrán después del proceso en la locación.
5. Destino. Se coloca la locación a la cual se dirige la entidad.
6. Regla. Se indica la regla de movimiento que por defecto es FIRST1. Es en esta pestaña donde se programa el porcentaje de salida de los automóviles en cada intersección semaforizada, esta programación se hizo en los semáforos dado que se sabe si un conductor continúa o no en el sistema recién después de pasar el semáforo.

7. Lógica de movimiento. Se indica el movimiento lógico de salida (García et al, 2013).

- **Arribos.** En este comando se modeló a qué calle llegarían los automóviles y la frecuencia con la que lo harían.

Se consideró una llegada de distribución exponencial, ya que el tiempo que transcurre entre la llegada de un automóvil y otro no depende del anterior ni de la cola que se haya formado. También se determinó que la llegada sería de uno en uno, estos debido a que las calles son de un solo carril.

- **Atributos.** Los atributos son las características que se le asignan a una entidad. Estos sirven para establecer algún tipo de etiqueta a la entidad con la finalidad que se utilicen cuando sea necesario.
- **Variables.** Las variables son una herramienta de conteo que se programan de acuerdo con lo que se necesite.

Dado que los indicadores que muestra ProModel para las entidades incluyen a las que abandonan el sistema, se hizo uso de variables para conocer los indicadores únicamente de aquellos automóviles que logran completar el recorrido.

- **Indicadores de las variables.**

- Valor mínimo. Es el tiempo mínimo que le tomó a un automóvil hacer el recorrido completo.
- Valor máximo. Es el tiempo máximo que le tomó a un automóvil hacer el recorrido completo.
- Valor promedio. Es el tiempo promedio que le tomó a un automóvil hacer el recorrido completo.

2.2.1.4. Validación

Para validar el modelo de simulación se utilizó la Tabla 3 para ver la similitud entre lo real y lo simulado.

Tabla 3 Validación del modelo de simulación

CALLE	Calle 1	Calle 2	Calle 3	Calle 4	Calle 5, etc.
REAL					
SIMULADO					
DIFERENCIA (%)					

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 3 se introdujeron los datos reales del promedio de cola, que gracias a la observación directa se pudo obtener. También se introdujeron los datos que arroja ProModel en la fila de simulado, esto con la intención de ver la diferencia y saber si al momento de hacer las propuestas de mejora estas serían viables y aplicables.

2.2.2. Metodología para desarrollar y correr la simulación de los escenarios de reprogramación de semáforos

En base al diagnóstico realizado mediante la simulación de la situación actual, se propuso tres escenarios de mejora, como se muestra en la Figura 10:

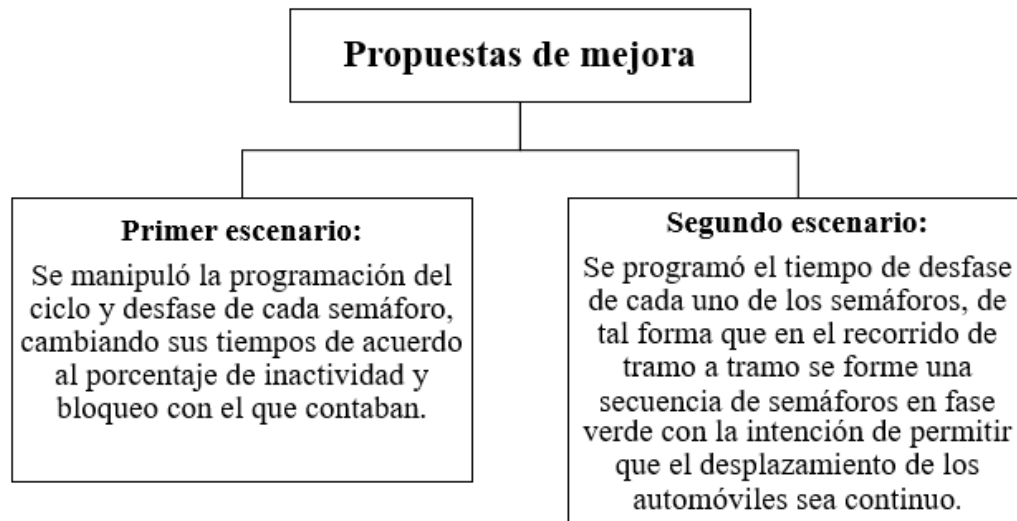


Figura 10: Propuesta de escenarios de mejora.

Para hacer las propuestas de mejora se manipularon aquellos elementos que dependían de la programación, como el tiempo de ciclo de los semáforos y sus desfases, incluso la cantidad de semáforos podría haber sido manipulada. Con esto se pudo ir haciendo una evaluación en ProModel haciendo la pregunta ¿Qué pasaría si...?, para intentar reducir en alguna medida los indicadores de congestión vehicular. Algunos elementos no se pueden manipular ya que no dependen de la programación, como por ejemplo la interllegada de los vehículos, las capacidades de las calles, el sentido de las calles, etc.

2.2.3. Metodología para analizar los resultados de los nuevos escenarios simulados en relación con el congestionamiento vehicular.

En cada uno de los dos escenarios propuestos que fueron modelados en ProModel, se obtuvieron indicadores de congestión tal cual se obtuvo para el análisis de la situación actual del sistema.

El análisis se hizo de forma independiente para cada comando, es decir para cada entidad (calles, semáforos, automóviles) y para las variables de conteo. Se comparó los resultados de los indicadores con la condición actual del sistema, para poder verificar si la programación de semáforos propuesta en los dos escenarios ayudó con la reducción del congestionamiento vehicular.

Se utilizó los mismos encabezados de las tablas que se usaron para el análisis de la situación actual, con la finalidad de tener el detalle de cada uno de los indicadores y ver su variación.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

En la Tabla 4, se detallaron las técnicas e instrumentos relacionados con el primer objetivo específico, ya que solo en ese objetivo se levantó información.

Tabla 4: Técnicas e instrumentos de investigación

Objetivo específico	Técnica	Instrumento	Fuente bibliográfica de la técnica
Modelar y analizar la situación inicial	Observación directa	Guía de observación	(Lema et al., 2011) (García et al., 2013)

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se valoró la viabilidad del instrumento y su aplicación.

Tabla 5: Validación del instrumento

Pregunta	Sí / No	Acciones por tomar
¿Se cuenta con acceso a toda la información necesaria para la investigación?	Sí	

FUENTE: Elaboración propia.

2.4. Procedimiento.

Primera Fase:

Para realizar la toma de datos, se elaboró diferentes fichas de observación para cada uno de los componentes requeridos por el modelo.

Con la ayuda de una persona experimentada en investigación de operaciones se hizo la validación del instrumento (ver anexo 1).

Segunda Fase:

Se hizo varias visitas a las calles y sus intersecciones semaforizadas para identificar el comportamiento del sistema, y tomar los datos que serían necesarios para la investigación. El objetivo de aplicar el instrumento a través de la observación directa también fue el de verificar si a simple vista existen grandes colas y bloqueos de pase entre una calle y otra.

Se observó las rutas que toman los automóviles en el recorrido de todo el sistema vial en estudio.

Se tomaron tiempos de ciclo de cada semáforo y los desfases entre ellos.

Con la ayuda del instrumento se hizo un conteo de la cantidad de automóviles en cola que existen en un tiempo determinado y se hizo un promedio.

Se contó la cantidad de calles y semáforos en todo el recorrido.

Cada calle principal tiene una capacidad diferente a la otra, por lo que se tomó los datos de los automóviles que alcanzaban en un tramo, y el largo de cada una de las calles.

El instrumento ayudo a contabilizar cuántos automóviles abandonan el sistema en cualquiera de sus puntos de intersección, y representarlo en porcentaje.

Tercera Fase:

Luego de aplicar el instrumento en las calles escogidas para realizar el estudio, los datos recolectados sirvieron para hacer el modelo de simulación en ProModel y todos fueron parte de la programación que se hizo para tratar de replicar el comportamiento del sistema.

2.5. Matriz de consistencia.

La siguiente tabla 6 muestra la matriz de consistencia.

Tabla 6 Matriz de Consistencia

Título	Formulación del problema	Objetivo	Variables $y=f(x)$	Indicadores	Diseño de la investigación
“Reprogramación de semáforos usando ProModel para disminuir la congestión vehicular en una vía semaforizada en la ciudad de Cajamarca”	¿En qué medida la reprogramación de semáforos usando ProModel disminuye la congestión vehicular en una vía semaforizada en la ciudad de Cajamarca?	Simular la reprogramación de semáforos usando ProModel para disminuir la congestión vehicular en una vía semaforizada en la ciudad de Cajamarca.	X. Programación de Semáforos en ProModel Y. Congestión vehicular	% de cumplimiento del diseño en ProModel. X.1 % Locaciones X.2 % Entidades X.3 % Arribos X.4 % Procesos X.5 % Variables Y.1 Calles. - Promedio de colas. - Tiempo por entrada promedio. - % de utilización. Y.2 Semáforos. - % de operación. - % inactivo. - % bloqueado. Y.3 Entidades	Según su propósito, es aplicada. La tesis se centra en aplicar la simulación como herramienta. Según su profundidad, es correlacional. Se evalúa la relación entre las variables que intervengan en el diseño. Según la naturaleza de los datos, es cuantitativa.

- Tiempo en sistema promedio.	Se analiza los indicadores para dar respuesta a los objetivos. Según su manipulación de variable, es cuasi experimental.
- Tiempo en operación promedio.	
- Tiempo detenido promedio	
Y.4 Variables de conteo	
- Tiempo mínimo de recorrido total.	
- Tiempo máximo de recorrido total.	
- Tiempo promedio de recorrido total.	

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO III: RESULTADOS.

3.1. Modelado y análisis de la situación actual.

3.1.1. Esquema para realizar el modelado.

Para realizar la investigación fue necesario ubicar una vía que cuente con semáforos en sus intersecciones y que además se pueda apreciar a simple vista que existe un congestionamiento vehicular al menos en las horas punta como son las 7 a.m., 1 p.m. y las 7 p.m. Estos escenarios de congestionamiento fueron ubicados en varias formas, como cuando se percibe que un semáforo se encuentra en fase verde y no tiene automóviles en cola ya que todos pasaron mucho antes de terminar esta fase, mientras que el semáforo de la calle que interseca aún está en fase roja y tiene una cola que sigue aumentando; o cuando existe una cola en una calle que a pesar de que el semáforo que le corresponde está en fase verde no pueden avanzar debido a un bloqueo en el siguiente tramo de la calle, lo que ocasiona que un automóvil que se encuentra al final de la cola tenga que esperar incluso dos ciclos del semáforo para recién poder pasar ese tramo de la calle.

Por tanto, la investigación tuvo lugar en una vía semaforizada comprendida entre las calles Jr. Ayacucho y Jr. Apurímac del distrito de Cajamarca, ubicadas en el centro de la ciudad a muy poca distancia de la Plaza de Armas, siendo la calle principal el Jr. Amazonas y las calles alimentadoras Jr. 5 esquinas, Jr. Guillermo Urrelo, Jr. Belén, Jr. 2 de Mayo y Jr. Del Batán.

El sentido en el que está diseñada la calle principal para que los automóviles transiten es de izquierda a derecha. En la figura 11 se puede apreciar el mapa de

estas calles, el sentido del tránsito para cada una de ellas, los semáforos en las intersecciones y sus nombres para poder identificarlas.

Los automóviles ingresan a la calle principal desde el lado izquierdo, y por cada una de las siguientes calles alimentadoras, hasta llegar al último punto en estudio que se encuentra en el extremo derecho de la figura 11 que llega a ser el último tramo de la calle principal Jr. Amazonas.

Estas calles también tuvieron que ser de un solo carril para poder hacer de forma más práctica la simulación en ProModel. Todas las calles cumplen con esta condición, a excepción de una que es el Jr. Dos de Mayo que cuenta con tres carriles, en teoría se necesitaría tres colas para poder modelar esta calle, pero se pudo evidenciar que una vez que los automóviles empiezan a pasar al siguiente tramo de la calle, lo hacen uno por uno ya que después de la intersección semaforizada que se encuentra entre esta calle y la calle principal, el Jr. Dos de Mayo se convierte en una calle de un solo carril y estos tres carriles se convertirían prácticamente en uno solo para su correcto modelamiento.

Como se aprecia en la Figura 11, existen calles alimentadoras que son las que conectan perpendicularmente con la calle principal. A pesar de que se logra apreciar 7 calles alimentadoras, se van a dejar de lado las dos que se ubican a los extremos (Jr. Ayacucho y Jr. Apurímac), dado que no cuentan con un semáforo en la intersección y porque la capacidad para modelar en ProModel es limitada.



Figura 11 Mapa de las calles a utilizar en la investigación

Tampoco se tuvieron en cuenta las calles por donde un automóvil pueda abandonar el sistema, es decir aquellos tramos que continúan a los de las calles alimentadoras; si bien más adelante se necesitará conocer el porcentaje de automóviles que salen del sistema, no fue necesario el modelamiento de estas calles ya que no son parte de la investigación como tal, sino que sólo interesa el porcentaje de salida.

3.1.2. Modelado en ProModel.

Con el mapa de las calles que se tuvieron en cuenta en la investigación, se consiguió tener un panorama más amplio de cada uno de los elementos que se necesitarían para poder hacer el modelado del sistema en ProModel.

En la Figura 12 se representa el esquema que se obtuvo del sistema vial propuesto en el apartado anterior.

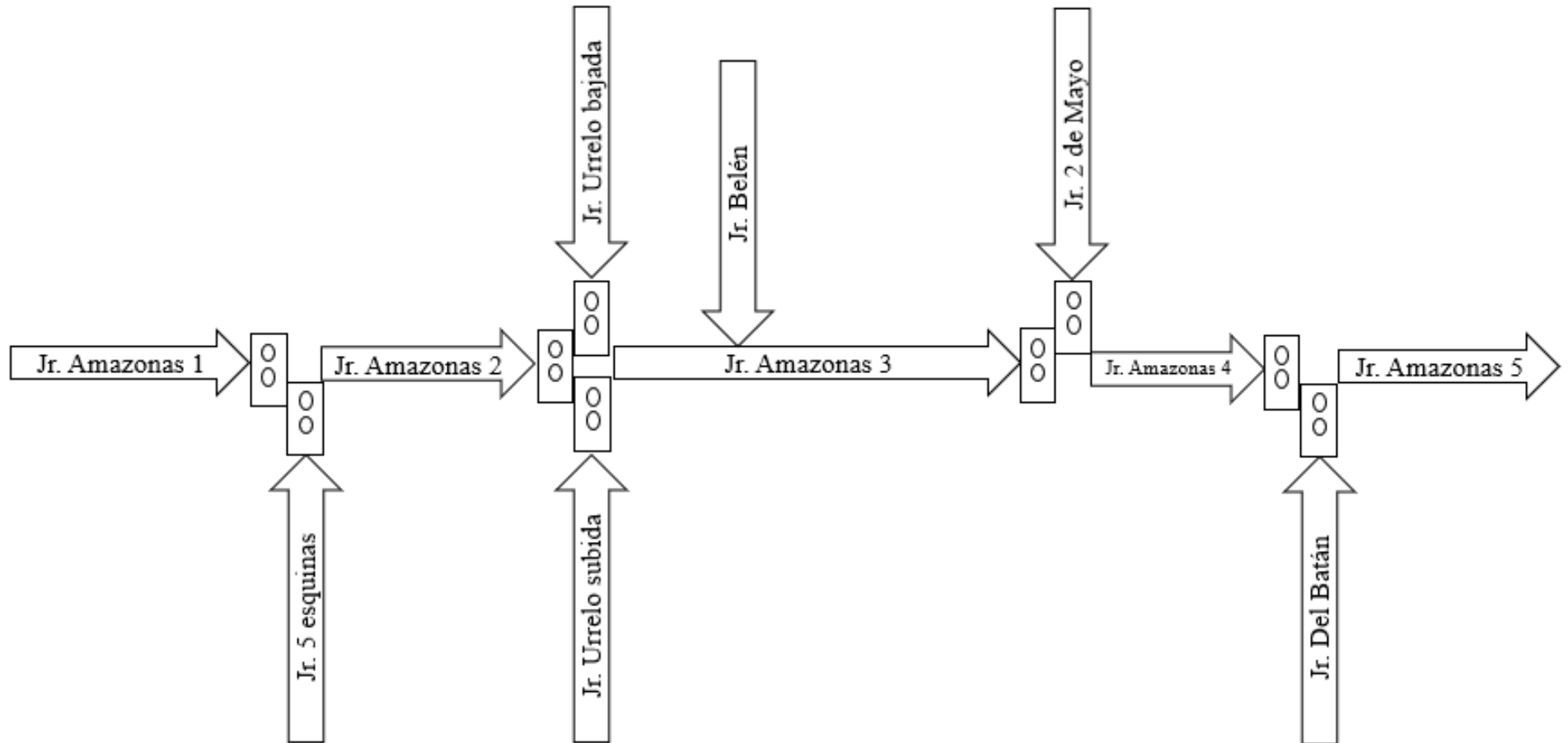


Figura 12 Esquemas de las calles para modelar en ProModel

Con la ayuda del esquema presentado en la Figura 12, se pudo identificar cuántas calles y semáforos serían necesarios para modelar este sistema vial en ProModel. En la Tabla 7 se presenta el detallado por cada uno, con sus respectivos nombres, por los cuales se los reconocerá en adelante.

Tabla 7: Calles y Semáforos a modelar

Número	Nombre de las calles	Semáforo
1	Jr. Amazonas 1	Semáforo Amazonas 1
2	Jr. Amazonas 2	Semáforo Amazonas 2
3	Jr. Amazonas 3	Semáforo Amazonas 3
4	Jr. Amazonas 4	Semáforo Amazonas 4
5	Jr. Amazonas 5	-
6	Jr. 5 esquinas	Semáforo 5 esquinas
7	Jr. Urrelo Subida	Semáforo Urrelo subida
8	Jr. Urrelo Bajada	Semáforo Urrelo bajada
9	Jr. Belén	-
10	Jr. 2 de Mayo	Semáforo 2 de Mayo
11	Jr. Del Batán	Semáforo del Batán

Fuente. Elaboración propia

Para modelar este esquema, fue recomendable trabajar de forma progresiva y construir en primer lugar uno o varios modelos simplificados que capturen las partes más esenciales del sistema de interés (Piera, Guasch, Casanovas & Ramos 2013), probando si el software nos permitiría, a través de los gráficos, representar las calles y cada una con su semáforo. La Figura 13 muestra la primera prueba de esta modelación en ProModel.

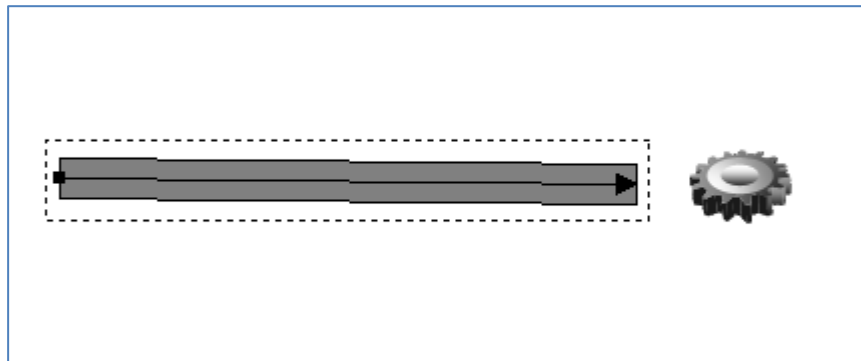


Figura 13: Primera prueba en ProModel.

Como se muestra en la figura, las calles pudieron ser representadas por el ícono que lleva de nombre “correa/fila”, ya que, a diferencia del resto de íconos, éste da la opción de convertirlo en una cola o línea de espera y de dimensionarlo como tal, mientras que los demás íconos no cuentan con esta característica.

También se utilizó la gráfica “Gear” para simular un semáforo y poder ver si de alguna manera se podían simular las fases de este. Con ayuda de una herramienta de programación de tiempos muertos se logró hacer que este ícono pueda simular las funciones de un semáforo.

Al ingresar estos gráficos se evidenció que el software no iba a permitir usar un mismo semáforo para dos calles en una intersección, sino que cada calle debería llevar su propio semáforo. Esto debido a que cada semáforo tiene una programación diferente de su tiempo de ciclo.

La maqueta donde se realizó las primeras pruebas quedó como se muestra en la Figura 14.

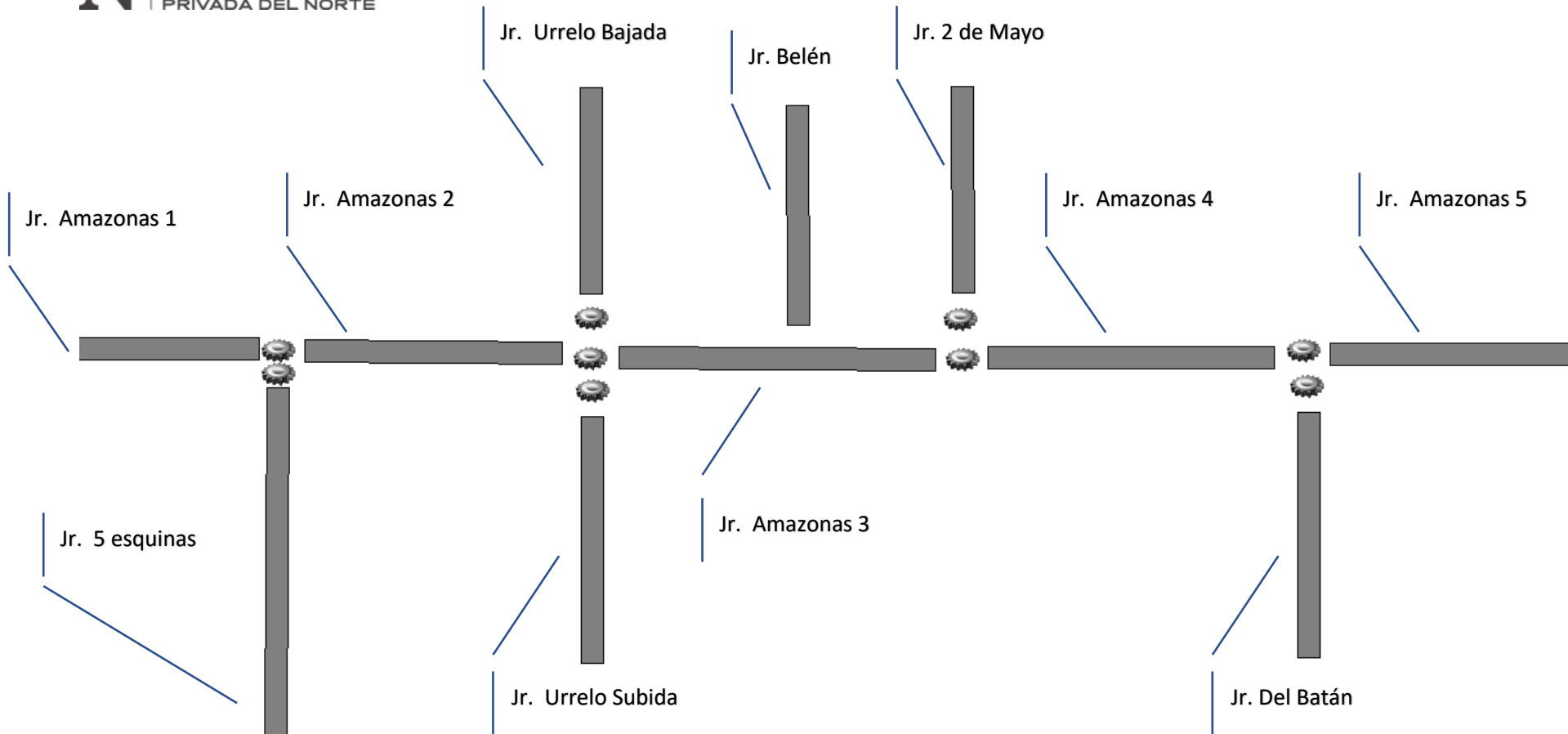


Figura 14 Modelado preliminar de las locaciones

3.1.2.1. Locaciones.

Cada calle y cada semáforo fueron modelados como una locación. Sumando la cantidad de estos, de acuerdo con la información de la Tabla 8, tenemos como resultado 20 locaciones, que es el número máximo que permite modelar ProModel.

Uno de los aspectos a tomar en cuenta fue la longitud de cada calle y su capacidad, la cual fue calculada tomando en cuenta el espacio que un automóvil ocupa, tal como lo indica la Figura 4.

Tabla 8: Longitud y capacidad de cada calle

Calle	Longitud (m)	Capacidad (automóviles por calle)
Jr. Amazonas 1	100	100
Jr. Amazonas 2	150	23
Jr. Amazonas 3	240	37
Jr. Amazonas 4	130	20
Jr. Amazonas 5	110	100
Jr. 5 esquinas	120	100
Jr. Urrelo Subida	100	100
Jr. Urrelo Bajada	140	100
Jr. Belén	130	100
Jr. 2 de Mayo	120	100
Jr. Del Batán	120	100

Fuente: Elaboración propia

Para las calles alimentadoras se consideró una capacidad de 100 automóviles.

En cuanto a los semáforos, se modelaron dos tiempos.

Primero, el tiempo de ciclo, el cual lo conforma la suma de las fases del semáforo, que en este caso se consideran sólo dos. La Tabla 9 refleja el tiempo de ciclo de cada uno de los semáforos y lo correspondiente a sus fases.

Tabla 9: Ciclos de los semáforos.

Semáforo	Fase verde (seg.)	Fase roja (seg.)	Ciclo (seg.)
Semáforo Amazonas 1	38	42	80
Semáforo Amazonas 2	60	38	98
Semáforo Amazonas 3	42	42	84
Semáforo Amazonas 4	42	42	84
Semáforo 5 esquinas	42	38	80
Semáforo Urrelo Subida	38	60	98
Semáforo Urrelo Bajada	38	60	98
Semáforo 2 de Mayo	42	42	84
Semáforo Del Batán	42	42	84

Fuente: Elaboración propia

La mayoría de los tiempos de fase para este sistema vial son de 42 segundos. Y el tiempo de ciclo que más se repite es de 84, que justamente es la suma de la fase en verde y roja con 42 segundos cada una.

Segundo, se modelaron los tiempos de desfases entre semáforos, los tiempos fueron tomados de tal forma que se pueda ver en un mismo lapso el cambio en los ciclos de estos. Cuando el tiempo programado para el ciclo de los semáforos en un sistema vial no es el mismo para todos, el tiempo de desfase entre ellos varía constantemente. Por tanto, al momento de levantar la información para ingresarla en ProModel, se tomó los datos en un tiempo cualquiera y luego se repitió los ciclos de los semáforos hasta encontrar el momento en que los desfases tuvieran un tiempo similar y se haga más práctico modelarlos en el software.

Para poder utilizar la herramienta de “Tiempos Muertos por Reloj”, se debió tener en cuenta que el ciclo comenzaría con la fase roja, ya que se tiene que programar en cuánto tiempo el semáforo se detendría por primera vez, y de ahí en adelante continuar alternando con la fase verde.

Por tal motivo, el tiempo de desfase se toma en un tiempo inicial cero y lo determinan los segundos que tarda un semáforo en llegar a la fase roja, es decir al primer tiempo muerto. Por ejemplo; si el tiempo de desfase es cero, quiere decir que el semáforo se encuentra al inicio de la fase roja; y si el tiempo de desfase es 38 significa que al semáforo le va a tomar 38 segundos hasta comenzar su ciclo con la fase roja.

La Tabla 10 muestra los desfases para cada semáforo en un tiempo cero.

Tabla 10: Desfases entre los semáforos

Semáforo	Desfase (seg.)
Semáforo Amazonas 1	38
Semáforo Amazonas 2	0
Semáforo Amazonas 3	15
Semáforo Amazonas 4	15
Semáforo 5 esquinas	0
Semáforo Urrelo Subida	38
Semáforo Urrelo Bajada	38
Semáforo 2 de Mayo	57
Semáforo Del Batán	57

FUENTE: Elaboración propia

La información, tanto del tiempo de ciclo como de los desfases, fue modelada en ProModel con la ayuda de la herramienta ya mencionada y se muestran en la Figura

15. En la pestaña “Frecuencia” se colocó el tiempo de ciclo de cada semáforo, en la pestaña “Primera vez” se colocó el tiempo de desfase, y en la pestaña “Lógica” se colocó lo que haría el semáforo una vez pasado el tiempo de desfase que en este caso es comenzar con la fase roja y se programa con la palabra “Wait” seguido de la cantidad de segundos que va a durar y sus unidades respectivas.

<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFARO_AMAZONAS_1				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
80 sec	38	99	Sí	Wait 42 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_5_ESQUINAS				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
80 sec	0	99	Sí	Wait 38 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_AMAZONAS_2				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
98 sec	0	99	Sí	Wait 38 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_URRELO_SUBIDA				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
98 sec	38	99	Sí	Wait 60 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_URRELO_BAJADA				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
98 sec	38	99	Sí	Wait 60 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_AMAZONAS_3				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
84 sec	15	99	Sí	Wait 42 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_2_DE_MAYO				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
84 sec	57	99	Sí	Wait 42 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_JR_AMAZONAS_4				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
84 sec	15	99	Sí	Wait 42 sec
<input type="checkbox"/> Tiempos Muertos por Reloj SEMAFORO_DEL_BATAN				
Frecuencia	Primera Vez	Prioridad	Programado...	Lógica...
84 sec	57	99	Sí	Wait 42 sec

Figura 15: Modelado de los tiempos de los semáforos.

Finalmente, todas las locaciones quedaron de la siguiente forma en ProModel

(Figura 16).


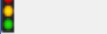

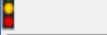

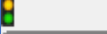

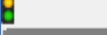


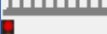





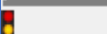



Icono	Nombre	Cap.	Unidades	TMs...
	JR. AMAZONAS_1	100	1	Ninguna
	SEMAFARO AMAZONAS_1	1	1	Reloj,
	JR. 5_ESQUINAS	100	1	Ninguna
	SEMAFORO_5_ESQUINAS	1	1	Reloj,
	JR. AMAZONAS_2	23	1	Ninguna
	SEMAFORO AMAZONAS_2	1	1	Reloj,
	JR. URRELO_SUBIDA	100	1	Ninguna
	SEMAFORO URRELO_SUBIDA	1	1	Reloj,
	JR. URRELO_BAJADA	100	1	Ninguna
	SEMAFORO URRELO_BAJADA	1	1	Reloj,
	JR. AMAZONAS_3	37	1	Ninguna
	SEMAFORO AMAZONAS_3	1	1	Reloj,
	JR. 2_DE_MAYO	100	1	Ninguna
	SEMAFORO_2_DE_MAYO	1	1	Reloj,
	JR. AMAZONAS_4	20	1	Ninguna
	SEMAFORO_JR AMAZONAS_4	1	1	Reloj,
	JR. DEL_BATAN	100	1	Ninguna
	SEMAFORO DEL_BATAN	1	1	Reloj,
	JR. AMAZONAS_5	INFINITE	1	Ninguna
	JR. BELEN	100	1	Ninguna

Figura 16: Locaciones del modelo.

Como se puede apreciar, cada locación llevó su nombre e ícono independiente, la capacidad de cada locación y en la columna “TMs” se hace la programación de los tiempos de los semáforos, por esta razón aparece la palabra “Reloj” en cada uno de ellos, mientras que para las calles dice “Ninguna”.

3.1.2.2. Entidades.

En este sistema las entidades son representadas por los automóviles que llegan a hacer al menos un tramo del recorrido. Para identificarlos se propuso un color

diferente para poder diferenciarlos de acuerdo con la calle alimentadora por la que ingresaban. También se definió la velocidad que, como previamente se ha mencionado, sería de 20 Km/hora, o aproximadamente 330 metros por minuto (mpm). La Figura 17 muestra las entidades del modelo.








Icono	Nombre	Velocidad (mpm)	Estadist
	Auto_Jr.Amazonas	330	Series de tiempo
	Auto_Jr.5_Esquinas	330	Series de tiempo
	Auto_Jr.Urrelo_Subida	330	Series de tiempo
	Auto_Jr.Urrelo_Bajada	330	Series de tiempo
	Auto_Jr.Belen	330	Series de tiempo
	Auto_Jr.2_de_Mayo	330	Series de tiempo
	Auto_Jr.Del_Batan	330	Series de tiempo

Figura 17 Entidades del modelo

3.1.2.3. Arribos.

Cada automóvil que ingresa al sistema lo hace por una calle alimentadora, entonces se necesita modelar qué automóvil llega a qué calle y la frecuencia con la que lo hace. La Tabla 11 muestra cuál fue el tiempo de interllegada que tuvo cada automóvil dependiendo la calle alimentadora por la cual ingresa al sistema.

Tabla 11 Tiempos de interllegada

Calle alimentadora	Interllegada (seg.)
Jr. Amazonas 1	9.7
Jr. 5 esquinas	5
Jr. Urrelo Subida	9.5
Jr. Urrelo Bajada	9.5
Jr. Belén	30
Jr. 2 de Mayo	4.6
Jr. Del Batán	8

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 18 se muestran estos datos ingresados en ProModel dentro del comando “Arribos”, especificando qué entidad o vehículo va a hacer su ingreso al sistema a través de qué locación o calle, la frecuencia con la que lo hace, la cantidad por arribo que será 1 y la ocurrencia de forma infinita para que siempre haya afluencia de automóviles.

Entidad...	Locación...	Cant. por Arribo...	Primera Vez...	Ocurrencias	Frecuencia
Auto_Jr.Amazonas	JR.AMAZONAS_1	1	0	INF	E(9.7)SEC
Auto_Jr.5_Esquinas	JR.5_ESQUINAS	1	0	INF	E(5)SEC
Auto_Jr.Urrelo_Subida	JR.URRELO_SUBIDA	1	0	INF	E(9.5)SEC
Auto_Jr.Urrelo_Bajada	JR.URRELO_BAJADA	1	0	INF	E(9.5)SEC
Auto_Jr.Belen	JR.BELEN	1	0	INF	E(30)SEC
Auto_Jr.2_de_Mayo	JR.2_DE_MAYO	1	0	INF	E(4.6)SEC
Auto_Jr.Del_Batan	JR.DEL_BATAN	1	0	INF	E(8)SEC

Figura 18 Modelado de los arribos

3.1.2.4. Procesos.

En este punto se establece la secuencia y lógica del proceso entre locaciones y entidades de acuerdo con lo requerido por el sistema.

Cada proceso cuenta con una entidad que llega a la locación, para esta investigación se refiere a los automóviles que llegan a los semáforos y permanecen un tiempo mínimo hasta que son liberados para ir a la siguiente locación de destino que vendría a ser otro tramo, y así sucesivamente. Este tiempo se consideró de 1.5 segundos dado que se observó que en promedio este es el tiempo que tarda un automóvil en cruzar un semáforo y se modela colocando las palabras “Wait 1.5 sec”.

Teniendo como premisa que de acuerdo con la calle alimentadora por donde entre el automóvil se lo identificó con un nombre y un color, la Figura 19 muestra cómo se hizo el ruteo con el total de calles y semáforos.

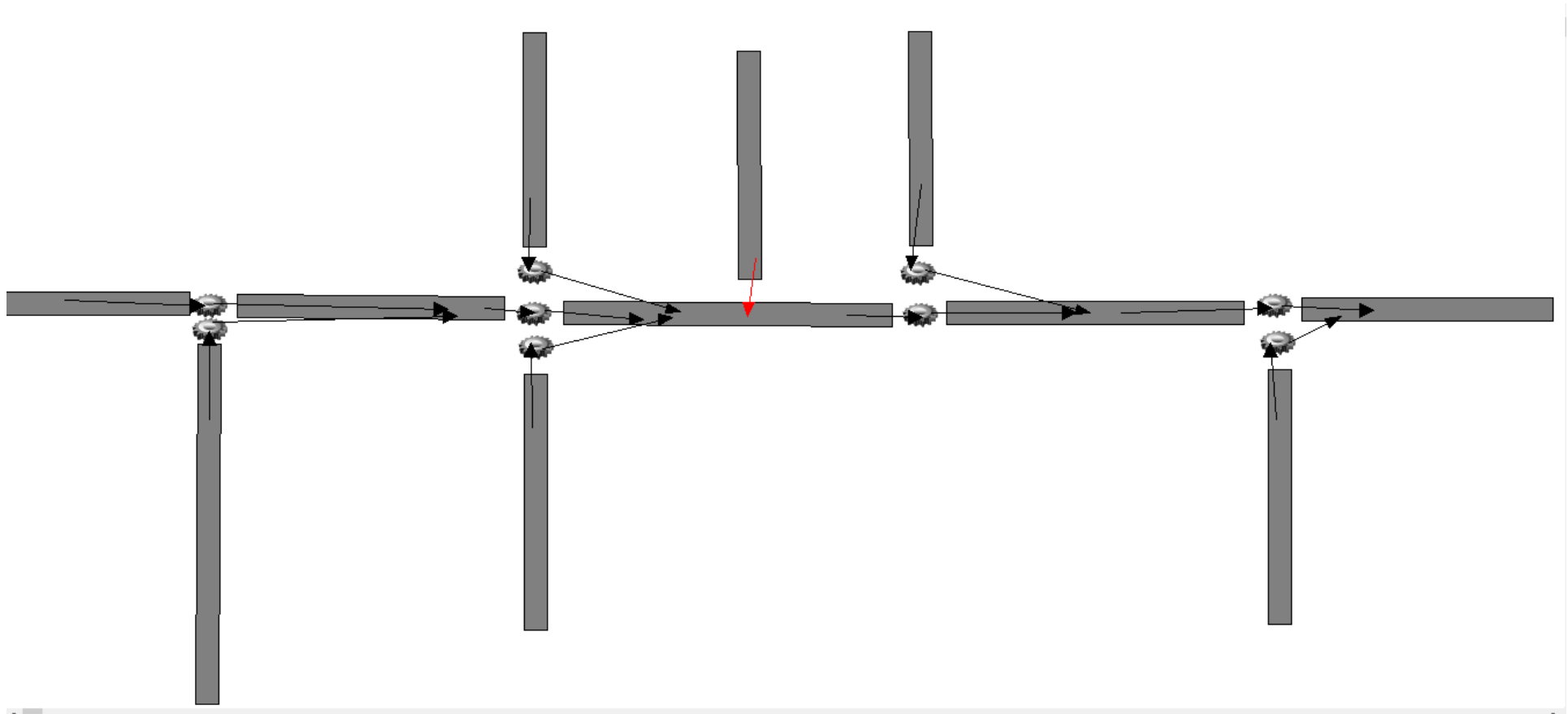


Figura 19 Modelo preliminar con ruteo

En esta parte del modelado del sistema, se requirió modelar el porcentaje de salidas o abandonos que tendrá. La Tabla 12 muestra esta información por cada semáforo.

Tabla 12 Salidas por cada semáforo

Semáforo	Salidas (%)
Semáforo Amazonas 1	15
Semáforo Amazonas 2	20
Semáforo Amazonas 3	25
Semáforo Amazonas 4	50
Semáforo 5 esquinas	35
Semáforo Urrelo Subida	45
Semáforo Urrelo Bajada	40
Semáforo 2 de Mayo	65
Semáforo Del Batán	50

Fuente: Elaboración propia

Este porcentaje representa la parte del total de carros que llegan a la intersección semaforizada que sale del sistema por dicha intersección; por tanto, la diferencia es el porcentaje de carros que continúan el recorrido y pasan al siguiente tramo. El proceso por seguir en el modelado será definido según la Tabla 13, a continuación:

Tabla 13 Proceso de ruteo para el modelado

Procesos			Enrutamiento		
Entidad que llega	Locación	Operación	Entidad que sale	Destino	Abandono
Auto Jr. Amazonas	Jr. Amazonas	-	Auto Jr. Amazonas	Semáforo Amazonas 1	-
Auto Jr. 5 esquinas	Jr. 5 esquinas	-	Auto Jr. 5 esquinas	Semáforo 5 esquinas	-
Auto Jr. Amazonas	Semáforo 1	Esperar 1.5 seg.	Auto Jr. Amazonas	Jr. Amazonas 2	0.15
Auto Jr. 5 esquinas	Semáforo 5 esquinas	Esperar 1.5 seg.	Auto Jr. 5 esquinas	Jr. Amazonas 2	0.35
Cualquiera*	Jr. Amazonas 2	-	Cualquiera*	Semáforo Amazonas 2	-
Auto Jr. Urrelo subida	Jr. Urrelo Subida	-	Auto Jr. Urrelo subida	Semáforo Urrelo subida	-
Auto Jr. Urrelo bajada	Jr. Urrelo bajada	-	Auto Jr. Urrelo bajada	Semáforo Urrelo bajada	-
Cualquiera*	Semáforo Amazonas 2	Esperar 1.5 seg.	Cualquiera*	Jr. Amazonas 3	0.2
Auto Jr. Urrelo subida	Semáforo Urrelo subida	Esperar 1.5 seg.	Auto Jr. Urrelo subida	Jr. Amazonas 3	0.45
Auto Jr. Urrelo bajada	Semáforo Urrelo bajada	Esperar 1.5 seg.	Auto Jr. Urrelo bajada	Jr. Amazonas 3	0.4
Auto Jr. Belén	Jr. Belén	-	Auto Jr. Belén	Jr. Belén	-
Cualquiera*	Jr. Amazonas 3	-	Cualquiera*	Semáforo Amazonas 3	-

Procesos			Enrutamiento		
Auto Jr. 2 de Mayo	Jr. 2 de Mayo	-	Auto Jr. 2 de Mayo	Semáforo 2 de Mayo	-
Cualquiera*	Semáforo 3	Esperar 1.5 seg.	Cualquiera*	Jr. Amazonas 4	0.25
Auto Jr. 2 de Mayo	Semáforo 2 de Mayo	Esperar 1.5 seg.	Auto Jr. 2 de Mayo	Jr. Amazonas 4	0.65
Cualquiera*	Jr. Amazonas 4	-	Cualquiera*	Semáforo Amazonas 4	-
Auto Jr. Del Batán	Jr. Del Batán	-	Auto Jr. Del Batán	Semáforo Amazonas 4	-
Cualquiera*	Semáforo Jr. Amazonas 4	Esperar 1.5 seg.	Cualquiera*	Jr. Amazonas 5	0.5
Auto Jr. Del Batán	Semáforo del batán	Esperar 1.5 seg.	Auto Jr. Del Batán	Jr. Amazonas 5	0.5
Cualquiera*	Jr. Amazonas 5	-	Cualquiera*	Fin del sistema	-

Fuente. Elaboración propia

* Ya que sólo se han definido los automóviles que entran a las calles alimentadoras, a las calles principales o a sus respectivos semáforos pueden entrar y salir cualquier automóvil que previamente haya estado en la locación inmediata anterior.

Con la información brindada por la Tabla 12, se hizo el modelado en ProModel para todos los procesos que requirió este sistema vial, tal como se explicó en Figura 9, en el Capítulo II.

3.1.2.5. Atributos.

Se consideró incluir una variable dentro del modelo para hacer el conteo del tiempo que le toma a un automóvil llegar hasta la última calle.

Se tomaron en cuenta dos atributos para identificar a los automóviles.

- Hora de arribo. Este atributo identificará a cada automóvil con el tiempo exacto en el que ingresó al sistema vial.
- Nivel de requerimiento. Este atributo identificará a cada automóvil según la calle por la cual ingrese al sistema, ósea según la calle alimentadora a la cual pertenezca.

La Figura 20 muestra el modelado de los atributos mencionados.

Atributos		
ID	Tipo	Clasificación
A_HORA_DE_ARRIBO	Real	Ent
A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO	Integer	Ent

Figura 20: Modelado de atributos.

En la columna “Tipo” se consideró Real para el atributo de Hora de Arribo ya que toma como referencia el tiempo y puede llevar decimales. Para el atributo Nivel de Requerimiento se consideró la opción “Integer” porque toma como referencia al automóvil y no puede llevar decimales.

Los atributos se programaron en el comando “Procesos”, en la pestaña “Operación”.

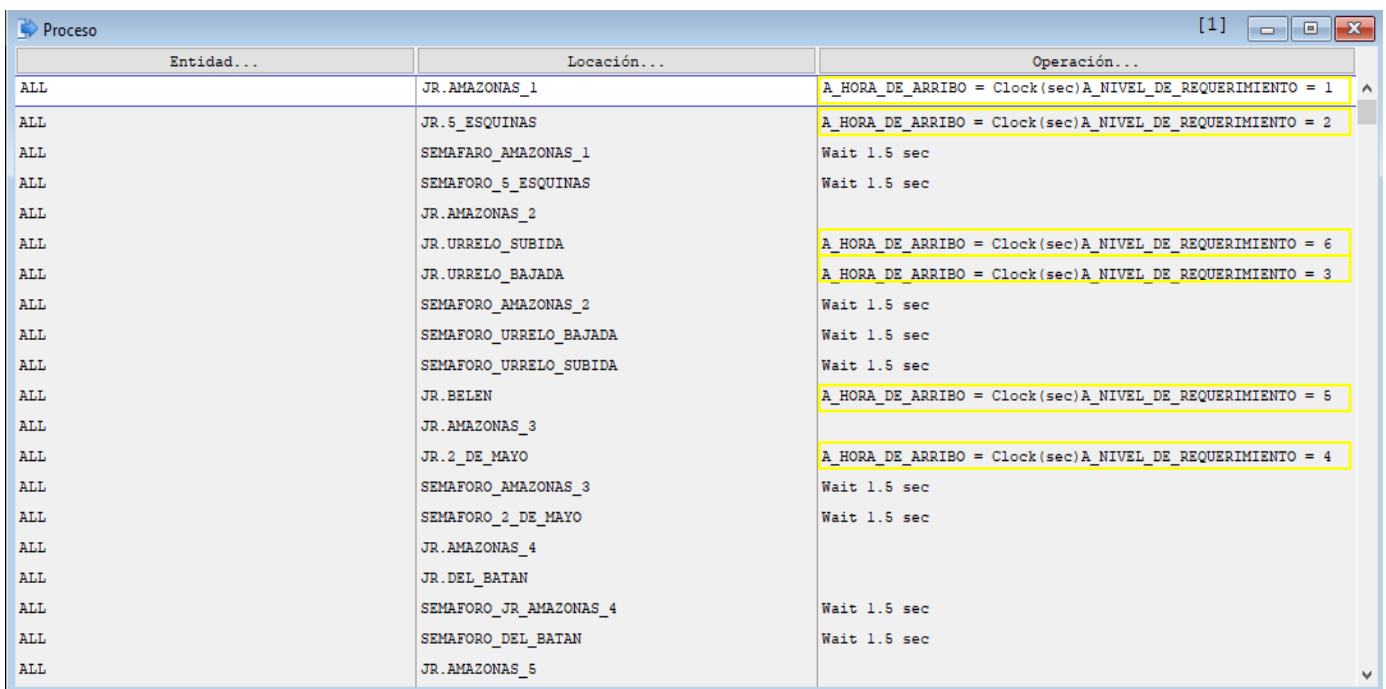
El atributo A_HORA_DE_ARRIBO fue definido utilizando el tiempo actual en el que se encuentre la corrida y se programó de la siguiente forma:

$$A_HORA_DE_ARRIBO = \text{Clock}(\text{sec})$$

Por su parte, el atributo A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO fue definido con un número para de esta forma indicarle al software a que calle pertenece cada automóvil, y se programó de la siguiente manera, siendo n el número asignado según la calle.

$$A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = n$$

Como se mencionó, los dos atributos identificarían a los automóviles desde que ingresan al sistema a través de la calle alimentadora que les corresponde, por tal razón se programaron en esta línea de proceso, como se muestra en la Figura 21.



Entidad...	Locación...	Operación...
ALL	JR. AMAZONAS_1	A_HORA_DE_ARRIBO = Clock(sec)A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 1
ALL	JR. 5_ESQUINAS	A_HORA_DE_ARRIBO = Clock(sec)A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 2
ALL	SEMAFARO_AMAZONAS_1	Wait 1.5 sec
ALL	SEMAFORO_5_ESQUINAS	Wait 1.5 sec
ALL	JR. AMAZONAS_2	
ALL	JR.URRELO_SUBIDA	A_HORA_DE_ARRIBO = Clock(sec)A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 6
ALL	JR.URRELO_BAJADA	A_HORA_DE_ARRIBO = Clock(sec)A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 3
ALL	SEMAFORO_AMAZONAS_2	Wait 1.5 sec
ALL	SEMAFORO_URRELO_BAJADA	Wait 1.5 sec
ALL	SEMAFORO_URRELO_SUBIDA	Wait 1.5 sec
ALL	JR. BELEN	A_HORA_DE_ARRIBO = Clock(sec)A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 5
ALL	JR. AMAZONAS_3	
ALL	JR. 2_DE_MAYO	A_HORA_DE_ARRIBO = Clock(sec)A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 4
ALL	SEMAFORO_AMAZONAS_3	Wait 1.5 sec
ALL	SEMAFORO_2_DE_MAYO	Wait 1.5 sec
ALL	JR. AMAZONAS_4	
ALL	JR. DEL_BATAN	
ALL	SEMAFORO_JR_AMAZONAS_4	Wait 1.5 sec
ALL	SEMAFORO_DEL_BATAN	Wait 1.5 sec
ALL	JR. AMAZONAS_5	

Figura 21 Programación de los atributos

3.1.2.6. Variable de Conteo.

Se consideró incluir una variable de conteo para cada calle alimentadora dentro del modelo para hacer el conteo del tiempo promedio que le toma a un automóvil llegar hasta la última calle, sin tomar en cuenta a aquellos que abandonan el sistema.

En la Figura 22 se muestra el modelado que se hizo de las variables.

Variables (global)			
Icono	ID	Tipo	Valor Inicial
Si	V_tiempo_de_ciclo_auto_amazonas	Real	0
Si	V_tiempo_de_ciclo_auto_sesquinas	Real	0
Si	V_tiempo_de_ciclo_auto_urrelo_bajada	Real	0
Si	v_tiempo_de_ciclo_urrelo_subida	Real	0
Si	V_tiempo_de_ciclo_auto_BELEN	Real	0
Si	v_tiempo_de_ciclo_auto_dos_de_mayo	Real	0

Figura 22: Modelado de variables.

Igual que en el atributo de Tiempo de Arribo, se consideró de tipo real a cada variable ya que al tener como referencia el tiempo, esta puede llevar decimales.

El ícono de las variables se representó a lado de cada calle para poder tener una mejor visualización durante la corrida de simulación.

La Figura 23 muestra el modelo preliminar con las variables incluidas.

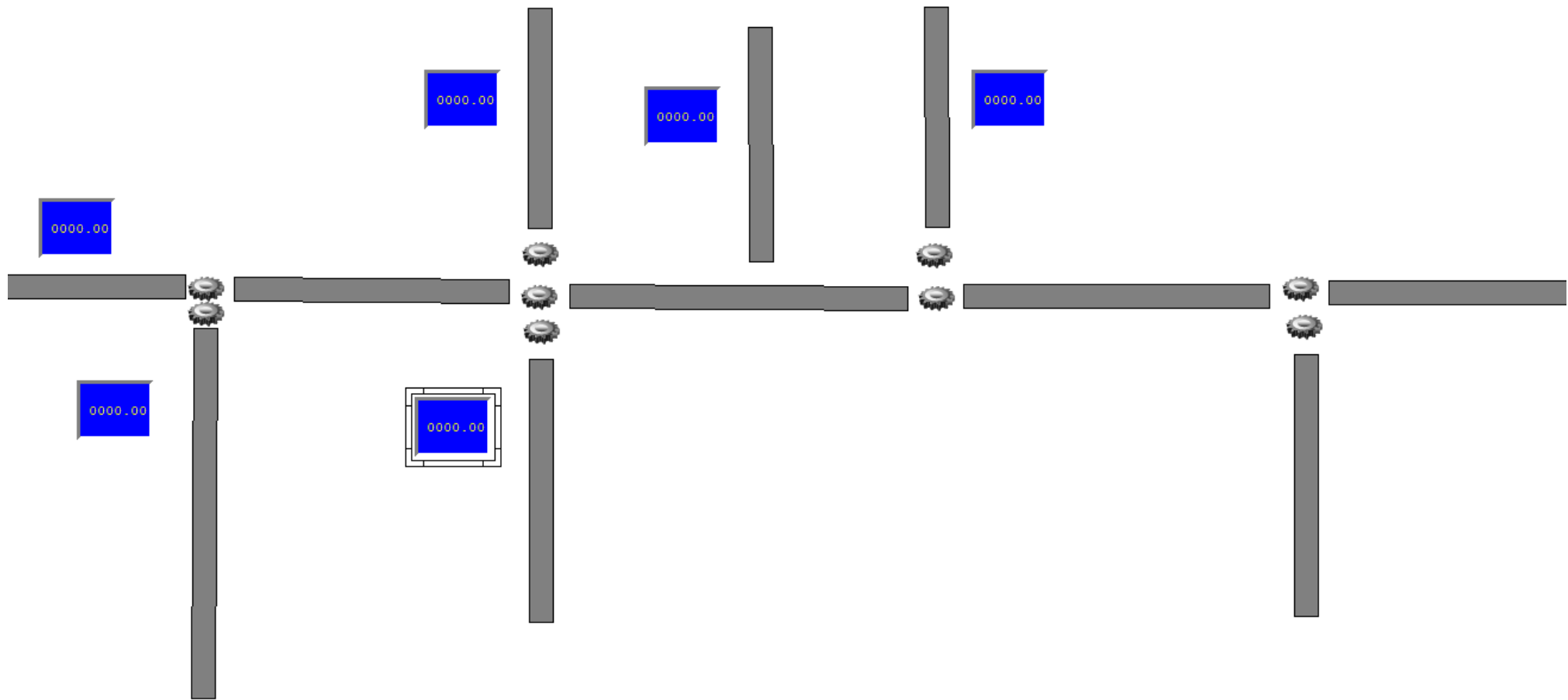


Figura 23: Modelo preliminar con variables.

Las variables se programan en la pestaña “Lógica de Movimientos” del comando “Procesos” exactamente en la línea de procesos correspondiente a la última calle ya que es esta en donde se quiere realizar el conteo de aquellos automóviles que llegan hasta este punto.

Para el uso que se le dio a esta variable se utilizó una estructura condicional comúnmente utilizada en la programación de sistemas, la función Si/Entonces o IF/THEN en inglés (Moreno, 2015). Que está compuesta por dos partes (Ecuación 3), una condicionante y una acción a hacerse de cumplirse la condición inicial:

Ecuación 3

$$\begin{array}{c}
 \text{Si } \underbrace{A_NIVEL\ DE\ REQUERIMIENTO = n}_{\text{(Atributo)}} \\
 \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{(Condicionante)}} \\
 \\
 \text{Entonces } \underbrace{V_Tiempo_de_Ciclo_Auto_Amazonas}_{\text{(Variable)}} = \underbrace{Clock(sec) - A_HORA\ DE\ ARRIBO}_{\text{(Acción)}}
 \end{array}$$

Esto quiere decir que **si** un automóvil de tipo **n** llega a la última calle, **entonces** la variable de conteo deberá restar la hora de arribo exacta de este automóvil (atributo de hora de arribo) al tiempo exacto que está transcurriendo en ese momento en la simulación (Clock (sec)).

La programación para las variables de conteo quedó de la siguiente manera, como se muestra en la Figura 24.

```
Lógica de Movimiento
1 If A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 1 Then
2 {
3     V_tiempo_de_ciclo_auto_amazonas = Clock(sec) - A_HORA_DE_ARRIBO
4 }
5 If A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 2 Then
6 {
7     V_tiempo_de_ciclo_auto_5esquinas = Clock(sec) - A_HORA_DE_ARRIBO
8 }
9 If A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 3 Then
10 {
11     V_tiempo_de_ciclo_auto_urrelo_bajada = Clock(sec) - A_HORA_DE_ARRIBO
12 }
13 If A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 4 Then
14 {
15     v_tiempo_de_ciclo_auto_dos_de_mayo = Clock(sec) - A_HORA_DE_ARRIBO
16 }
17 If A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 5 Then
18 {
19     V_tiempo_de_ciclo_auto_BELEN = Clock(sec) - A_HORA_DE_ARRIBO
20 }
21 If A_NIVEL_DE_REQUERIMIENTO = 6 Then
22 {
23     v_tiempo_de_ciclo_urrelo_subida = Clock(sec) - A_HORA_DE_ARRIBO
24 }
```

Figura 24 Programación de las variables

3.2. Diagnóstico actual.

Luego de haber ingresado todos los datos a ProModel, se hizo una corrida de tres horas, ya que durante el día existen tres horas punta, y se recolectó las estadísticas arrojadas para poder conocer los indicadores de la situación actual.

Se pudo ingresar el 100% de los datos requeridos por ProModel dependiendo los comandos que se utilizaron. Las locaciones, las entidades, los arribos, los procesos y las variables de conteo fueron modelados en su totalidad.

3.2.1. Indicadores para las calles.

Para las calles de la simulación, se obtuvieron tres indicadores, el contenido promedio o cantidad de cola, el tiempo que permanece un automóvil en la calle, y su porcentaje de utilización; como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Indicadores de la situación actual - Calles

Calle	Contenido promedio	Tiempo por entrada promedio (seg.)	Porcentaje de Utilización (%)
Jr. AMAZONAS 1	6.54	61.49	6.54
JR. 5 ESQUINAS	21.47	106.72	21.47
JR. AMAZONAS 2	16.64	74.76	72.35
JR. URRELO SUBIDA	7.87	75.18	7.87
JR. URRELO BAJADA	9.39	88.14	9.39
JR. AMAZONAS 3	32.81	99.69	88.67
JR. 2 DE MAYO	26.34	118.59	26.34
JR. AMAZONAS 4	16.47	50.94	82.37
JR. BELÉN	0.98	30.17	0.98
JR. DEL BATAN	4.23	34.62	4.23

Fuente: Elaboración propia

Según la información de la Tabla 13, se observa que el Jr. Amazonas 3 y Jr. Amazonas 4 son las calles más críticas con un contenido promedio de cola de 32.81 y 16.64 automóviles respectivamente, y un porcentaje de utilización de 88.67% y 82.37%. Esto da a entender que la capacidad de estas calles casi siempre está a tope y por esta razón es muy probable que se den los bloqueos.

3.2.2. Validación.

Dado que uno de los principales y más relevantes indicadores para la investigación es el contenido promedio o número de automóviles en cola, se dispuso de este indicador para verificar si los datos obtenidos por medio de la simulación se acercan a lo real.

Se usó la Tabla 15 para hacer la comparación de este indicador:

Tabla 15: Validación del modelado con respecto a las colas

Calle	Simulado (Automóviles)	Real (Automóviles)	Diferencia (%)
Jr. AMAZONAS 1	6.54	7	6.6
JR. 5 ESQUINAS	21.47	22	2.4
JR. AMAZONAS 2	16.64	17	2.1
JR. URRELO SUBIDA	7.87	8	1.6
JR. URRELO BAJADA	9.39	9	4.3
JR. AMAZONAS 3	32.81	31	5.8
JR. 2 DE MAYO	26.34	24	9.8
JR. AMAZONAS 4	16.47	18	8.5
JR. BELÉN	0.98	1	2
JR. DEL BATAN	4.23	7	39.5

Fuente: Elaboración propia

El promedio del porcentaje de diferencia entre lo simulado y lo real respecto a la cantidad de automóviles que están en cola en cada calle es de 4.8%, dejando de lado al Jr. Del Batan cuyo promedio de cola es muy variable. El mejor ajuste entre lo simulado y lo real es aquel que haga el error más pequeño y según las pruebas realizadas para este modelo este fue lo más cercano que se estuvo de lo real (Baca, 2013). También se considera que el mejor ajuste a la realidad es aquel que

proporciona una buena idea del fenómeno en estudio. Por tanto, se puede decir que el modelo de simulación sí se acerca a lo real, y que en base a los datos que este arroja se puede hacer un análisis de la situación actual y proponer escenarios que permitan disminuir todos los indicadores de congestión vehicular del sistema.

3.2.3. Indicadores para los semáforos.

Se hizo el análisis para cada uno de los semáforos en el sistema, de acuerdo con tres porcentajes, el de operación, el de inactividad y el de bloqueo. En la Tabla 16 se puede apreciar los resultados obtenidos para estas locaciones.

Tabla 16: Indicadores para los semáforos

Semáforo	% Operación	% Inactivo	% Bloqueado
Semáforo Amazonas 1	33	36	31
Semáforo Amazonas 2	55	10	35
Semáforo Amazonas 3	98	2	0
Semáforo Amazonas 4	96	4	0
Semáforo 5 esquinas	57	14	29
Semáforo Urrelo Subida	40	28	32
Semáforo Urrelo Bajada	41	27	32
Semáforo 2 de Mayo	65	7	28
Semáforo Del Batán	36	64	0

Fuente: Elaboración propia

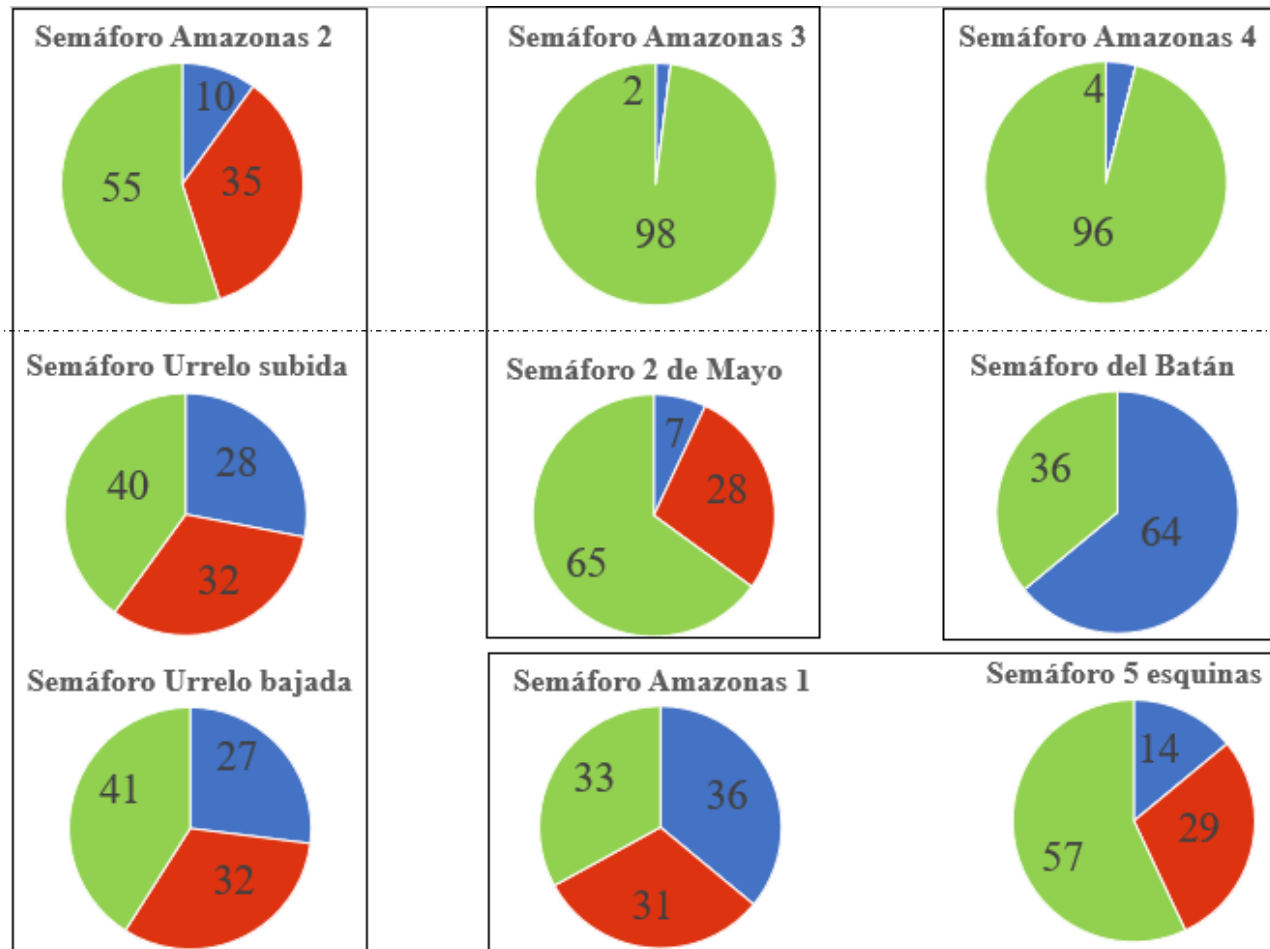
Observamos que los semáforos Amazonas 1, Amazonas 2, 5 esquinas, Urrelo subida y bajada, y 2 de Mayo tienen un porcentaje de bloqueo de casi la tercera parte del tiempo que están operando, esto incide directamente en la congestión vehicular de la vía porque significa que existen automóviles en las calles que a pesar de ver que el semáforo en fase verde, se encuentran estancados porque la siguiente calle está bloqueada. También podemos observar que las dos calles que más

porcentaje de utilización cuentan, no tienen bloqueo alguno en sus semáforos, esto ya que el semáforo Amazonas 3 y Amazonas 4 tienen el mismo desfase, lo que permite que los automóviles tengan tránsito fluido en ese tramo.

En la Figura 25 se muestra gráficamente los indicadores para cada uno de los semáforos, agrupados por intersecciones.

Los semáforos con mayor porcentaje de inactividad son los del Jr. Urrelo subida, Jr. Urrelo bajada y Jr. Amazonas 1, que según la Tabla 16 también son en donde se generan menos cola. Por esta razón, se puede decir que la fase verde de estos semáforos está muy por encima de lo que la cola demanda, esto en contraposición al semáforo que los acompaña en la intersección semaforizada que llegarían a ser el semáforo Amazonas 2 y el semáforo 5 esquinas, cuyo porcentaje de inactividad es muy menor, 10% y 14% respectivamente.

CALLES
PRINCIPALES



■ % operación
 ■ % bloqueado
 ■ % inactivo

Figura 25 Indicadores de los semáforos

Dado que los indicadores de la simulación dependen no sólo de la programación de semáforos, sino que también dependen en gran medida de la interllegada de los vehículos al sistema, estas llegadas, al ser de distribución exponencial, ocasionan que por momentos exista gran afluencia de automóviles y el sistema tenga picos de alta congestión vehicular, como sucede en el ámbito real; y por otro lado, también tenga momentos de poca afluencia, en los cuales sí existe una fluidez en el tránsito de automóviles. Son en los momentos de alta congestión donde se crean los bloqueos de las calles, que es el indicador más crítico y el que se busca reducir de primera intención. Y en los momentos en donde la congestión ha bajado un poco, los autos pueden tener un tránsito más fluido y es aquí donde los semáforos empiezan a tener tiempos de inactividad. Esta es la razón por la cual existen semáforos que posiblemente tengan un porcentaje de bloqueo y también un porcentaje de inactividad, cabe resaltar que cada ciclo de los semáforos es independiente y no todos atienden la misma cantidad de cola.

A pesar de que se busca eliminar por completo los bloqueos de las calles, con la simulación se puso a prueba escenarios para lograrlo, pero no significa que se pueda realizar. Lo ideal sería buscar un equilibrio entre el tiempo de operación y el tiempo de inactividad, tratando de disminuir al mínimo los tiempos de bloqueo.

3.2.4. Indicadores para los automóviles.

Otros indicadores relevantes que podemos encontrar gracias a ProModel, son los tiempos que influyen en el comportamiento de los automóviles en el sistema.

Son básicamente tres tiempos, el tiempo promedio en el sistema, el tiempo promedio esperando y el tiempo de bloqueo promedio (Tabla 17).

Tabla 17: Indicadores para los automóviles

Automóvil	Tiempo en sistema promedio (seg.)	Tiempo en operación promedio (seg.)	Tiempo detenido promedio (seg.)
Auto Jr. Amazonas 1	234.1	92.7	141.4
Auto Jr. 5 esquinas	236.4	79.5	156.9
Auto Jr. Urrelo subida	160.6	58.7	101.9
Auto Jr. Urrelo bajada	181.4	70	111.4
Auto Jr. Belén	185.7	98.1	87.6
Auto Jr. 2 de Mayo	141.1	35.1	106

FUENTE: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, estos tiempos son determinados por el promedio de todos los automóviles que participan en el sistema, independientemente de si lo abandonan o no, o por cual calle lo abandonan. Dentro de este grupo existen los automóviles que posiblemente sólo recorrieron un tramo y luego salieron del sistema.

Este indicador nos muestra cuánto tiempo un automóvil transitó por las calles del sistema vial, y según la tabla 15 en orden desde arriba hasta abajo (de acuerdo a su cercanía a la calle final) se puede apreciar que un automóvil en condiciones ideales, es decir sin detenciones por colas o bloqueos, tendría que realizar el recorrido total, desde el Jr. Amazonas 1 o Jr. 5 esquinas, en 132 segundos considerando la velocidad de 330 metros por segundo, suponiendo que parte desde alguna de las dos primeras calles alimentadoras; pero, existe una diferencia de más de 100 segundos entre el dato arrojado y el ideal, esto suponiendo que el automóvil llega al final del recorrido, que en su mayoría no es así ya que el sistema cuenta con salidas, y por tanto si un automóvil sólo estuvo en el sistema en pocos tramos, este tiempo también afecta al promedio y lo disminuye.

En la Tabla 18 se muestran los porcentajes de operación de cada automóvil, respecto al total del tiempo en operación.

Tabla 18: Porcentajes de operación para el indicador de automóviles

Automóvil	Tiempo en operación promedio (%)
Auto Jr. Amazonas 1	40
Auto Jr. 5 esquinas	34
Auto Jr. Urrelo subida	37
Auto Jr. Urrelo bajada	39
Auto Jr. Belén	53
Auto Jr. 2 de Mayo	25
PROMEDIO	38

FUENTE: Elaboración propia

El automóvil que ingresa por Jr. 2 de Mayo, es el que menos porcentaje de operación tiene, esto debido a que es la segunda calle con mayor cantidad de cola y su respectivo semáforo muestra un porcentaje de bloqueo de 28%. Esto nos da a entender que el movimiento de los automóviles que ingresan por esta calle es el más lento de todo el sistema.

El porcentaje promedio de operación de todos los automóviles que intervienen en el flujo del sistema vial es 38%, que llega a ser sólo un poco más de la tercera parte del tiempo total, es decir en promedio el 62% de tiempo el automóvil se encuentra detenido ya sea por un bloqueo o por estar en cola esperando que el semáforo cambie a su fase verde para pasar.

3.2.5. Indicadores para la variable de conteo.

Se utilizó la variable de conteo juntamente con los atributos para poder determinar cuatro indicadores únicamente de aquellos automóviles que finalizan el recorrido y llegan hasta la calle Jr. Amazonas 5, para conocer el tiempo de ciclo completo que tarda un automóvil en realizar todo el recorrido.

Para poder analizar estos indicadores de mejor forma y poder compararlos con un dato óptimo, se tuvo que calcular cuál era el tiempo de ciclo ideal que le tomaría a un automóvil llegar hasta el final del recorrido, es decir si es que no existiese ningún tipo de impedimento que lo haga detenerse. Considerando la velocidad de 330 mpm y la longitud de todas las calles que tendría que recorrer hasta la última, en la Tabla 19 se muestra los tiempos ideales para cada automóvil según la calle alimentadora por la cual ingresan y la longitud de las calles que tienen que recorrer.

Tabla 19: Tiempo ideal de recorrido completo por automóvil

Automóvil	Longitud a recorrer (m)	Tiempo ideal (seg.)
Auto Jr. Amazonas 1	730	132
Auto Jr. 5 esquinas	750	137
Auto Jr. Urrelo subida	580	105
Auto Jr. Urrelo bajada	620	113
Auto Jr. Belén	610	111
Auto Jr. 2 de Mayo	360	65

FUENTE: Elaboración propia.

Los 3 indicadores de las variables de conteo se muestran en la

Tabla 20.

Tabla 20: Indicadores de las variables de conteo

Variable de Conteo	Valor Mínimo (seg)	Valor Máximo (seg)	Valor Promedio (seg)	VALOR IDEAL (seg)
Tiempo de ciclo Auto Amazonas	165.5	604.2	322.1	132
Tiempo de ciclo Auto 5 Esquinas	160.7	530.4	360.8	137
Tiempo de ciclo Auto Urrelo Bajada	147.3	448.6	268.4	105
Tiempo de ciclo Auto Urrelo Subida	129.9	407.4	258.1	113
Tiempo de ciclo Auto Belén	143.1	255.4	210	111
Tiempo de ciclo Auto 2 de Mayo	68.6	475.7	191.8	65

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede ver que, comparando los indicadores con el valor ideal de cada uno de los tiempos de ciclo, en promedio un automóvil se demora más del doble de lo ideal en hacer el recorrido completo. El más crítico es nuevamente el tiempo de ciclo del Auto 2 de Mayo, al automóvil le toma el triple del tiempo llegar hasta la última calle, en 191.8 segundos (3 minutos aprox.) hace un recorrido corto de 360 metros, lo cual es mucho tiempo para un recorrido de esta magnitud.

A partir del cuadro también podemos ver que existen automóviles a los cuales les ha tomado 604.2 segundos llegar a completar el recorrido desde la calle Jr. Amazonas 1 hasta la calle Jr. Amazonas 5, es decir han pasado 730 metros en 10 minutos, lo cual es un punto muy crítico ya que el tiempo de recorrido sin interrupciones para estos tramos es de 132 segundos (2.2 minutos) y en los momentos de mayor congestión se llega casi a quintuplicar esta cifra.

En cuanto a los valores mínimos, también existieron automóviles que casi no encontraron interrupciones, no se toparon con bloqueos o colas que les impidan avanzar, como es el caso del valor mínimo para la variable Tiempo de Ciclo Auto dos de Mayo, que es 68.6 segundos y lo ideal es 65 segundos, por lo que se puede inferir que cuando el sistema no estaba con un congestionamiento alto, hubieron automóviles que hicieron el recorrido sin encontrar colas ni semáforos en fase roja.

Gracias a los datos de esta variable, se pudo medir con más exactitud si las propuestas de mejora efectivamente convenían a este sistema vial. Ya que hay más precisión haciendo el conteo de sólo los autos que terminan todo el recorrido, a que si se saca un promedio de todos los autos que participan en el sistema vial, indiferentemente de si lo abandonan o no.

Esto se refleja en la realidad ya que, en momentos de alta congestión, se aprecia que hay automóviles que avanzan muy lento debido a las colas y que en muchas ocasiones no sólo se enfrentan a un bloqueo de calles, sino que a dos o tres, o que al salir de una larga cola tengan que pasar al siguiente tramo de la calle a nuevamente formar una cola y esperar que el semáforo cambie para poder pasar, incluso se puede apreciar que existen automóviles en cola que ven el semáforo cambiar a la fase verde y por algún bloqueo no pueden continuar su camino y el semáforo vuelve a la fase roja, haciendo que estos esperen hasta 2 ciclos del semáforo para poder pasar. Esto hace que el tránsito de los automóviles sea más lento y llegue a extremos, como el mostrado, en que los conductores pierdan minutos estancados en el tráfico.

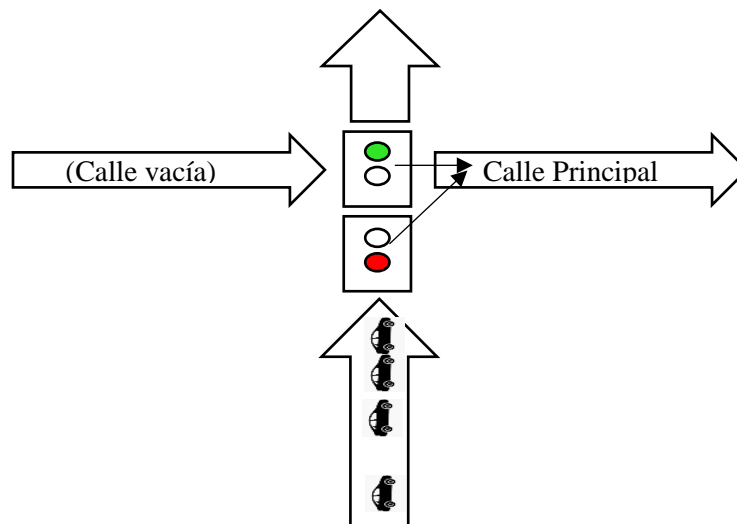
3.3. Desarrollar y correr la simulación de los escenarios propuestos para la reprogramación del tiempo de los semáforos.

Para poder proponer escenarios de mejora, primeramente, se tuvo en cuenta que existen aspectos que no se pueden alterar en el sistema vial, como por ejemplo la interlegada de los vehículos, las distancias y capacidad de las calles, la velocidad de los automóviles, etc. Entonces, los elementos que si podemos manipular son principalmente los semáforos y sus tiempos, tanto de ciclo como desfase.

3.3.1. Primer escenario.

De acuerdo con el análisis realizado de la situación actual del sistema vial en estudio, se pudo determinar que uno de los principales problemas es la existencia de bloqueos en la mayoría de los semáforos.

También se aprecia que existe un tiempo de inactividad en los semáforos que se podría reducir dependiendo la cola que tenga la calle. Esta propuesta se fundamenta principalmente en que el largo de la cola de una calle, muchas veces demanda un tiempo menor de la fase verde para que pasen todos los automóviles y desaparezca la cola. Es por esto que se crean los tiempos de inactividad, ya que la fase verde dura más



de lo necesario, y se tendría que programar de acuerdo con la cola que se forme en la calle que regula. La Figura 26 muestra como es este comportamiento.

Aquí se puede ver de manera gráfica lo mencionado anteriormente, cuando una calle está libre de cola y aun así faltan algunos segundos para terminar la fase verde que bien podrían ser aprovechados por la calle que interseca, lógicamente dependiendo de la cola que esta calle tenga y a su vez la interllegada de vehículos a la misma.

En la Tabla 21 se muestra los porcentajes de inactividad versus la formación de colas y los tiempos de sus fases.

Con ^{Figura 26 Comportamiento del sistema para la primera propuesta} es ^{ndo el largo} de cola que tenga la calle a la cual corresponde el semáforo, con esto también se pretendió analizar si con esta reprogramación, los bloqueos de los semáforos disminuyen y/o desaparecen dado que habría más fluidez en el paso de los carros y no habrían largas colas llegando en grandes bloques al siguiente tramo, sino que las calles enviarían menos cantidad para formar la siguiente cola y evitar la saturación de las calles.

Tabla 21: Información para el primer escenario propuesto

Intersecciones	Semáforo	% Inact.	Promedio de cola (autos)	Fase roja	Fase Verde
1	Semáforo Amazonas 1	36	6.54	42	38
	Semáforo 5 esquinas	14	21.47	38	42
2	Semáforo Amazonas 2	10	16.64	38	60
	Semáforo Urrelo Subida	28	7.87	60	38
	Semáforo Urrelo Bajada	27	9.39	60	38
3	Semáforo Amazonas 3	2	32.81	42	42
	Semáforo 2 de Mayo	7	26.34	42	42
4	Semáforo Amazonas 4	4	16.47	42	42
	Semáforo Del Batán	64	4.23	42	42

FUENTE: Elaboración propia

Para la intersección 1, podemos ver que se ha destinado un tiempo de 38 segundos para la fase verde del semáforo Amazonas 1 y la cola promedio de su calle es de menos de 7 vehículos; mientras que el Semáforo 5 Esquinas, que es el otro que regula esta intersección 1, tiene un promedio de cola de casi 22 vehículos y un tiempo de fase verde de 42 que es muy cercano a lo destinado en el otro semáforo tan sólo para 7 vehículos. En esta intersección se muestra claramente la intención en esencia de la propuesta para este primer escenario, correspondió en esta ocasión probar disminuyendo la fase verde del semáforo Amazonas 1 y aumentando la del semáforo 5 esquinas.

Para la intersección 2, la cual cuenta con tres semáforos, se ve que la calle Jr. Amazonas 2 cuenta con una cola promedio de casi 17 automóviles y está al 72.35% de su utilización, por lo que se puede decir que el tiempo de fase verde asignado de 60 segundos puede ser correcto, pero los semáforos correspondientes a las calles de Urrelo subida y Urrelo bajada cuentan con un tiempo de fase verde de 38 segundos

para colas de casi 8 y 10 carros respectivamente, de igual forma su porcentaje de inactividad es elevado en comparación al semáforo Amazonas 2, siendo casi el triple. Por esta razón, se vio también una oportunidad de reducir el tiempo de fase verde a estos dos semáforos y mantener el de la calle principal.

Para la intersección 3 y 4, se tienen los semáforos con porcentajes de inactividad más bajos, a excepción del Semáforo Del Batán que tiene el más alto porcentaje de inactividad de todo el sistema con un 64% pero como vimos anteriormente esta calle es muy variable en cuanto al promedio de cola y al estar tan cerca al final del recorrido, no tiene mucha influencia. Para estas dos intersecciones, entonces se propuso incrementar el tiempo de la fase verde de los semáforos de la calle principal que son Semáforo Amazonas 3 y Semáforo Amazonas 4 cuyas calles cuentan con un porcentaje de utilización elevados de 89% y 82% respectivamente.

En cuanto al tiempo de desfases entre un semáforo y otro, se programaron todos los desfases de los semáforos de las calles principales en cero, ya que al ser los tiempos de programación de ciclos diferentes entre ellos no era necesario establecer un desfase específico.

Se propusieron tiempos nuevos para la programación de los semáforos de toda la vía, la Tabla 22 y la Tabla 23 muestran los nuevos datos que fueron modelados para este primer escenario propuesto, de acuerdo al análisis presentado en base a la información inicial.

Tabla 22: Tiempo de ciclo de los semáforos - Escenario propuesto 1

Semáforo	Fase verde (seg.)	Fase roja (seg.)	Ciclo (seg.)
Semáforo Amazonas 1	25	42	67
Semáforo Amazonas 2	60	25	85

Semáforo Amazonas 3	50	42	92
Semáforo Amazonas 4	50	42	92
Semáforo 5 esquinas	42	25	67
Semáforo Urrelo Subida	25	60	85
Semáforo Urrelo Bajada	25	60	85
Semáforo 2 de Mayo	42	50	92
Semáforo Del Batán	42	50	92

FUENTE: Elaboración propia.

Las fases de los semáforos fueron cambiadas, disminuyendo en su mayoría el tiempo de ciclo de los semáforos, a excepción de los semáforos Amazonas 3, Amazonas 4, 2 de Mayo y del Batán, pertenecientes a las intersecciones 3 y 4; en los cuales se propuso mantener el tiempo en rojo de los principales pero aumentar sólo un poco (8 seg.) en el de las calles alimentadoras, que la utilización de las calles alimentadoras sobrepasaba el 80%; esto repercutió en la fase verde de las calles principales ya que aumentó en 5 segundos también.

Para iniciar la simulación, se programaron todos los desfases de los semáforos principales en cero, es decir el ciclo de cada uno de ellos inició en el tiempo cero por tanto comenzaron todos con la fase roja. Mientras que los semáforos de las calles alimentadoras iniciaron con su fase verde correspondiente.

Como se mencionó en el subtítulo *3.1.2.1 Locaciones*, cuando los tiempos de los ciclos de los semáforos no son iguales, el tiempo de desfase es variable; y aunque programemos un desfase inicial, en algún momento, estos serán distintos. Pero de todas formas se trabajó con un desfase inicial cero para los semáforos de las calles principales. (Tabla 23)

Tabla 23: Tiempo de desfase de los semáforos - Escenario propuesto 1

Semáforo	Desfase (seg.)
Semáforo Amazonas 1	0
Semáforo Amazonas 2	0
Semáforo Amazonas 3	0
Semáforo Amazonas 4	0
Semáforo 5 esquinas	42
Semáforo Urrelo Subida	25
Semáforo Urrelo Bajada	25
Semáforo 2 de Mayo	42
Semáforo Del Batán	42

FUENTE: Elaboración propia.

Con estos datos ingresados a ProModel, se obtuvieron nuevos indicadores los cuáles se presentan a continuación.

3.3.1.1. Indicadores para las calles – Escenario propuesto 1.

Los tres indicadores obtenidos para las calles figuran en la Tabla 24 a continuación:

Tabla 24: Indicadores para las calles - Escenario propuesto 1

Calle	Contenido promedio	Tiempo por entrada promedio (seg.)	Porcentaje de Utilización (%)
Jr. AMAZONAS 1	3.33	34.36	3.33
JR. 5 ESQUINAS	5.92	29.30	5.92
JR. AMAZONAS 2	6.90	32.73	29.98
JR. URRELO SUBIDA	4.62	44.03	4.62
JR. URRELO BAJADA	5.25	51.69	5.25
JR. AMAZONAS 3	20.64	65.47	55.79
JR. 2 DE MAYO	14.67	67.23	14.67
JR. AMAZONAS 4	13.53	42.17	67.65
JR. BELÉN	0.75	23.59	0.75
JR. DEL BATAN	5.05	39.13	5.05

FUENTE: Elaboración propia.

Se ve una reducción considerable en el contenido promedio de cola de todo el sistema vial, principalmente en las calles más congestionadas como son Jr. 5 esquinas que disminuyó 15.55 automóviles, que representa aproximadamente un 70% de la cola promedio de la situación actual; también tenemos un beneficio grande en la cola formada para el tramo Jr. Amazonas 3 de la calle principal, que pasó de 32.81 automóviles a 20.64, es decir disminuyó 12.17 automóviles y su porcentaje de utilización bajó de 88.67% a 55.79%; y en la calle Jr. 2 de Mayo, que es la que alimenta al sistema con una mayor frecuencia en la llegada de automóviles, se redujo a casi la mitad la formación de cola, de 26.34 automóviles a 14.67. En general, el contenido promedio de automóviles en cola de todo el sistema tuvo una reducción de 14.27 automóviles, a 8.1 automóviles; en otras palabras, **se redujo en promedio 6.17 automóviles** en la formación de las colas de todo el sistema.

Entonces, si hubo una reducción de colas, esto impacta directamente en el tiempo de permanencia que tienen los autos en cada tramo del sistema, en general hubo una **reducción promedio de 31 segundos de tiempo de permanencia en cada tramo.**

La principal calle beneficiada fue Jr. 5 esquinas que pasó de un tiempo de 106.7 segundos a 29.3 segundos, esto va en concordancia con la reducción mencionada anteriormente en el contenido promedio de automóviles en cola.

A su vez, ya que la utilización de las calles depende de la cantidad de cola que se forman en las mismas, se notó que hubo una disminución también en el porcentaje de utilización de las calles principales, **se redujo de un promedio de 81.13% de utilización, a 51.14%**. Es decir que las 3 calles principales del sistema, Jr.

Amazonas 2, Jr. Amazonas 3 y Jr. Amazonas 4, no estarán tan saturadas y en promedio estos tramos serán utilizados casi siempre a la mitad de su capacidad.

3.3.1.2. Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 1.

Los tres indicadores correspondientes a los semáforos también sufrieron un cambio a partir de la programación de sus ciclos y desfases. En la Tabla 25 se muestran los resultados. Debido a que los semáforos son la entidad que podemos manipular para proponer mejoras, en este caso, los demás indicadores llegan a ser una dependencia de estos.

Tabla 25 Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 1

Semáforo	% Operación	% Inactivo	% Bloqueado
Semáforo Amazonas 1	39	61	0
Semáforo Amazonas 2	45	55	0
Semáforo Amazonas 3	87	13	0
Semáforo Amazonas 4	88	12	0
Semáforo 5 esquinas	48	52	0
Semáforo Urrelo Subida	53	47	0
Semáforo Urrelo Bajada	51	49	0
Semáforo 2 de Mayo	71	18	11
Semáforo Del Batán	42	58	0

FUENTE: Elaboración propia.

Dado que se redujeron los tiempos de las fases verdes, dependiendo al promedio de cola, podemos notar que este primer escenario ha permitido una mayor fluidez en el tránsito, reduciendo los tiempos de espera innecesarios en las intersecciones, eliminado casi por completo todos los tiempos de bloqueo en los semáforos, que es lo que genera colas más grandes en el sistema y por tanto mayor congestión.

En la situación actual del sistema existen 6 de 9 semáforos que cuentan con porcentajes de bloqueo, y en promedio es el 31% del tiempo total programado, es decir la tercera parte. Para el escenario propuesto 1, sólo existe un semáforo con bloqueo y con un porcentaje del 11%, este es el Semáforo 2 de Mayo por el cual pasan los automóviles con mayor frecuencia, y los que ingresan al sistema tienen que ir al Jr. Amazonas 4 cuya capacidad es muy pequeña y es alimentada también por la cola que se genera en el tramo de la calle Jr. Amazonas 3. Esta es la razón por la que el Semáforo 2 de Mayo todavía cuenta con un porcentaje de bloqueo,

aunque reducido a casi su tercera parte en comparación a la situación actual, de 28% a 11%.

Otro dato relevante es con respecto al porcentaje de inactividad de los semáforos. En los indicadores arrojados para la situación actual, vemos que los semáforos cuentan con porcentaje de inactividad y porcentajes de bloqueo; sin embargo, en los indicadores para la propuesta del escenario 1 ya casi no existen bloqueos, pero la inactividad de los semáforos ha aumentado en promedio casi el doble, esto quiere decir que el sistema se ha estabilizado en cuanto a la fluidez del tránsito vehicular, pero aun así los tiempos programados para las fases verdes de los semáforos son mayores a lo que se requiere en las colas de los tramos. Al ser la llegada de los vehículos aleatoria, esta inactividad toma relevancia, ya que quiere decir que, de incrementarse la frecuencia de llegada de los automóviles, el sistema cuenta con algunos de estos tiempos de inactividad que bien podrían ser utilizados en una situación así, que en esta ocasión aumentó, en promedio, de 21.3% de inactividad en la situación actual, a 40.55% para el escenario propuesto 1.

Los semáforos con menor cantidad de inactividad son los de las calles que mayor porcentaje de utilización tienen, que son el Semáforo Jr. Amazonas 3 y Jr. Amazonas 4, con 13% y 12% respectivamente. Comparando estos semáforos con los de la situación actual, se aprecia que su porcentaje de inactividad también disminuyó dado que ahora las calles a los cuales pertenecen no están tan congestionadas. Esto es relevante ya que de lo que antes sólo tenían 2% o 3% de inactividad, ahora con la reprogramación existe un margen un poco más amplio, por si la interllegada de alguna de las calles alimentadoras aumenta.

3.3.1.3. Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 1.

Todos los automóviles disminuyeron su tiempo que permanecieron detenidos en el sistema, ya sea esperando en cola o en un bloqueo, también se disminuyó su tiempo de permanencia desde que ingresan al sistema vial hasta que salen. Por lo tanto, el porcentaje de su tiempo en operación también aumentó. En la Tabla 26 se muestran los indicadores para los automóviles.

Tabla 26: Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 1

Semáforo	Tiempo en sistema promedio (seg.)	Tiempo en operación promedio (seg.)	Tiempo detenido promedio (seg.)
Auto Jr. Amazonas 1	138.2	92.6	45.6
Auto Jr. 5 esquinas	107.8	78.2	29.6
Auto Jr. Urrelo subida	102.6	58.0	44.6
Auto Jr. Urrelo bajada	117.3	70.0	47.3
Auto Jr. Belén	132.3	96.2	36.1
Auto Jr. 2 de Mayo	89.1	36.0	53.1

FUENTE: Elaboración propia.

Hubo una reducción en el tiempo promedio que un automóvil estuvo detenido en el sistema, lo máximo que se redujo fue para la calle Jr. 5 esquinas cuyo tiempo de detención era de 156.9 y ahora, con el escenario propuesto, solamente permanece detenido 29.6 segundos. Esto va de la mano también con que la cola que se formaba en esta calle disminuyó drásticamente, y para el semáforo que la regula se eliminó su tiempo de bloqueo por completo. De esta información se puede inferir que probablemente el mayor tiempo que el auto estuvo detenido fue en la calle por la cual ingresó en el sistema, es decir la calle Jr. 5 esquinas.

El tiempo en operación promedio se mantuvo igual ya que se refiere al tiempo que un automóvil estuvo moviéndose en las calles, es decir no importa cuánto tiempo lleve detenido o por qué razón, en el momento en que retome la marcha este indicador empezará a hacer el conteo del tiempo. Por tanto, es mejor representarlo en porcentaje con respecto al tiempo total de permanencia en el sistema, es decir incluyendo el tiempo detenido (Tabla 27).

Tabla 27: Porcentajes de operación para los automóviles - Escenario propuesto 1

Automóvil	Tiempo en operación promedio (%)
Auto Jr. Amazonas 1	67
Auto Jr. 5 esquinas	73
Auto Jr. Urrelo subida	57
Auto Jr. Urrelo bajada	60
Auto Jr. Belén	73
Auto Jr. 2 de Mayo	40
PROMEDIO	62

FUENTE: Elaboración propia.

Con la propuesta se aumentó el porcentaje promedio que un automóvil está en operación. Para la situación actual del sistema fue de 38% y ahora con la propuesta este indicador aumentó a 62%.

El automóvil que ingresa por Jr. 2 de mayo sigue siendo el que menos promedio de operación tiene, pero con la propuesta aumentó de 28% a 40%. Esto debido a que la cola que se forma en esta calle ahora es menos y el porcentaje de bloqueo del semáforo que la regula disminuyó también de 28% a 11%.

3.3.1.4. Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 1.

Como se mencionó anteriormente, estas variables de conteo muestran los tiempos sólo de aquellos automóviles que hicieron el recorrido hasta la última calle. La Tabla 28 muestra la información para el escenario propuesto 1.

Tabla 28: Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 1.

Variable de Conteo	Valor Mínimo (seg)	Valor Máximo (seg)	Valor Promedio (seg)	VALOR IDEAL (seg)
Tiempo de ciclo Auto Amazonas	142.9	264.3	200.3	132
Tiempo de ciclo Auto 5 Esquinas	146.6	259.2	196.8	137
Tiempo de ciclo Auto Urrelo Bajada	119.6	246.4	181.1	105
Tiempo de ciclo Auto Urrelo Subida	115.8	245.9	175.5	113
Tiempo de ciclo Auto Belén	116.1	199.6	155.4	111
Tiempo de ciclo Auto 2 de Mayo	68.5	290.6	137.5	65

FUENTE: Elaboración propia

En estos indicadores también hubo una disminución respecto a la situación actual. El tiempo promedio que le toma a los automóviles hacer el recorrido ahora se acerca más a lo ideal. El tiempo de ciclo del automóvil que ingresa por Jr. 2 de Mayo, sigue siendo el más alto en comparación con su ideal, casi el doble. Pero, aun así, ha habido una disminución considerable ya que en la situación actual le toma el triple del tiempo ideal llegar a completar el recorrido.

Con el escenario 1 propuesto, ahora a un automóvil le toma como máximo 264 segundos hacer el recorrido completo, desde la primera calle Jr. Amazonas 1; es decir en 4.4 minutos puede llegar al final, a lo que anteriormente le tomaba 10 minutos.

3.3.2. Segundo escenario.

Para este segundo escenario se propuso probar con una técnica llamada “La Ola Verde”, la cual es un fenómeno inducido intencionalmente, en el cual una serie de semáforos se coordinan para permitir el flujo continuo del tráfico sobre varias intersecciones en una misma dirección (Jeri, 2015).

Para poder modelar esta propuesta de “La Ola Verde”, los vehículos tienen que desplazarse todos a una velocidad promedio, que en este caso es de 330 Km por hora, el mínimo establecido por ley. Esto hará que vean una cascada progresiva de luces verdes, sin la necesidad de detenerse mucho tiempo a esperar el cambio de fase, como muestra en el esquema de la Figura 27.

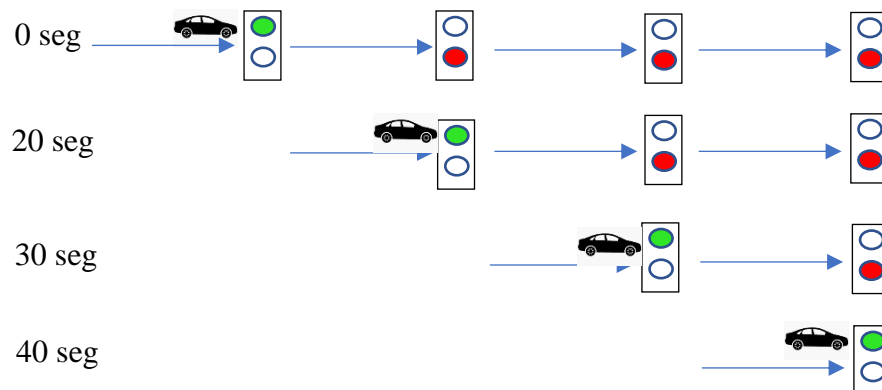


Figura 27 Esquema de la "Ola Verde"

Entonces, según lo mostrado en la Figura 27, suponiendo que el tiempo de desfase entre cada semáforo es de 10 segundos y el auto va a una misma velocidad siempre, se puede apreciar que conforme este avanza, el ciclo del semáforo está programado para cambiar a fase verde al momento que llega el automóvil.

Para el escenario número dos, se programaron con el mismo tiempo todos los ciclos de los semáforos (Tabla 29).

Tabla 29: Tiempo de ciclo de los semáforos - Escenario propuesto 2

Semáforo	Fase verde (seg.)	Fase roja (seg.)	Ciclo (seg.)
Semáforo Amazonas 1	40	40	80
Semáforo Amazonas 2	40	40	80
Semáforo Amazonas 3	40	40	80
Semáforo Amazonas 4	40	40	80
Semáforo 5 esquinas	40	40	80
Semáforo Urrelo Subida	40	40	80
Semáforo Urrelo Bajada	40	40	80
Semáforo 2 de Mayo	40	40	80
Semáforo Del Batán	40	40	80

FUENTE: Elaboración propia.

Para que el fenómeno de “ola verde” permanezca en el tiempo, se tuvo que modelar el mismo tiempo de ciclo y el mismo tiempo de fase verde y roja en todos los semáforos. Se modeló el tiempo de ciclo de los semáforos en 80 segundos y tanto la fase roja como la fase verde en 40 segundos cada una.

Para poder hacer que exista una cascada progresiva de fases verdes, se tuvo que hacer un análisis de cuánto tiempo le toma a un automóvil ir de un tramo a otro en las calles principales, se aplicó una regla de tres simple con la velocidad y la longitud de las calles (Ecuación 4).

Ecuación 4

$$\text{Tiempo de recorrido por tramo} = \frac{60 \text{ segundos} * \text{Longitud de la calle}}{\text{Velocidad promedio del automóvil}}$$

Con la ayuda de esta fórmula, en la Tabla 30 se muestran el tiempo que le toma a un automóvil ir por los tramos Jr. Amazonas 2, Jr. Amazonas 3 y Jr. Amazonas 4.

Tabla 30: Tiempo de recorrido en los tramos principales

Calle	Velocidad (mpm)	Longitud (m)	Tiempo (seg)
Semáforo Amazonas 2	330	150	28
Semáforo Amazonas 3	330	240	44
Semáforo Amazonas 4	330	130	24

FUENTE: Elaboración propia.

En el cálculo se redondeó el tiempo al inmediato superior, ya que es preferible que sobren fracciones de segundos, a que falten.

Con estos tiempos se pudo hacer el modelado de los desfases para cada uno de los semáforos de las calles principales. Los semáforos de las calles alimentadoras se adecúan a los principales, incluyendo al semáforo Jr. Amazonas 1 que comenzará su ciclo con los 40 segundos de su fase verde.

Los desfases quedaron como se muestra en la Tabla 31. Como se explicó anteriormente, cuando en el momento del cálculo de desfase este cae en algún segundo de la fase roja, no se puede modelar el inicio de la fase rojo en negativo, por tanto, se coloca como desfase el tiempo que se tardaría en llegar al siguiente inicio de ciclo, es decir a la siguiente fase roja. Esto pasó con el Semáforo Amazonas 2, Semáforo 2 de Mayo y Semáforo Amazonas 4.

Tabla 31: Tiempos de desfase - Escenario propuesto 2

Semáforo	Desfase (seg.)
Semáforo Amazonas 1	40
Semáforo Amazonas 2	68
Semáforo Amazonas 3	32
Semáforo Amazonas 4	56
Semáforo 5 esquinas	0

Semáforo	Desfase (seg.)
Semáforo Urrelo Subida	28
Semáforo Urrelo Bajada	28
Semáforo 2 de Mayo	72
Semáforo Del Batán	16

FUENTE: Elaboración propia.

Con el tiempo de ciclo y el de desfase, se procedió a ingresar la información en ProModel para este escenario propuesto 2.

3.3.2.1. Indicadores para las calles – Escenario propuesto 2.

Los tres indicadores obtenidos para las calles, figuran en la Tabla 32 a continuación:

Tabla 32: Indicadores para las calles – Escenario propuesto 2

Calle	Contenido promedio	Tiempo por entrada promedio (seg.)	Porcentaje de Utilización (%)
Jr. AMAZONAS 1	5.34	52.0	5.34
JR. 5 ESQUINAS	42.57	217.4	42.57
JR. AMAZONAS 2	18.38	86.7	79.90
JR. URRELO SUBIDA	3.32	32.3	3.32
JR. URRELO BAJADA	4.29	41.2	4.29
JR. AMAZONAS 3	31.09	97.9	84.02
JR. 2 DE MAYO	8.09	37.2	8.09
JR. AMAZONAS 4	11.66	37.2	58.28
JR. BELÉN	0.89	26.9	0.89
JR. DEL BATAN	4.29	34.7	4.29

FUENTE: Elaboración propia.

Como se ve en la tabla, también hubo una reducción considerable comparado con los indicadores de la situación actual del sistema, el promedio de colas para las calles más congestionadas se redujo como el del Jr. 2 de Mayo y Jr. Amazonas 3,

que son las que tienen mayor llegada de automóviles y la de menos capacidad de las principales, respectivamente. Esta propuesta sería muy adecuada al igual que la primera, de no ser por la cola formada en la calle Jr. 5 esquinas, cuya interllegada de automóviles es una de las más altas con 5 segundos, el promedio de cola llega a ser de 42.57 automóviles, lo cual llega a ser una exageración y en la práctica sería una cola permanente de aproximadamente 3 cuadras.

El tramo que se ve más beneficiado por esta propuesta de la “ola verde” es el del Jr. Amazonas 4, ya que la cola se redujo de 16.47 a 11.66 automóviles, y se nota el impacto en el porcentaje de utilización que pasó de 82% a 58.28%, incluso mejor que el 67.65% que se obtuvo con la propuesta 1.

El tramo del Jr. Amazonas 3 se mantuvo casi con el mismo porcentaje de utilización y es la calle principal donde se concentra la mayor cantidad de congestión vehicular, por tal razón las calles que la anteceden, que llegan a depender del Jr. Amazonas 3, sufren este congestionamiento y se manifiesta en las colas que llegan a formarse, y como la del Jr. 5 esquinas es la que tiene mayor llegada de automóviles, entonces es la que recibe el mayor impacto llegando a formar una larga cola.

3.3.2.2. Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 2.

Para este escenario, los semáforos volvieron a tener tiempos de bloqueo y dado que se programó el mismo tiempo de ciclo para todos, indiferentemente de lo que demande la cola del tramo correspondiente, aumentó la cantidad de semáforos con porcentaje de operación muy bajos. La Tabla 33 muestra estos indicadores.

Tabla 33: Indicadores para los semáforos – Escenario propuesto 2

Semáforo	% Operación	% Inactivo	% Bloqueado
Semáforo Amazonas 1	30	25	45
Semáforo Amazonas 2	63	5	32
Semáforo Amazonas 3	94	2	4
Semáforo Amazonas 4	93	7	0
Semáforo 5 esquinas	58	6	36
Semáforo Urrelo Subida	31	54	15
Semáforo Urrelo Bajada	31	53	16
Semáforo 2 de Mayo	65	35	0
Semáforo Del Batán	37	63	0

FUENTE: Elaboración propia.

Para este escenario existieron 5 de 9 semáforos con tiempos de bloqueo, siendo los más altos los que conforman la intersección 1, el Jr. Amazonas 1 contó con 45% de tiempo de bloqueo pero no se manifestó tanto en el promedio de cola ya que su llegada de automóviles es una de las más bajas en el sistema, lo contrario sucedió con 5 esquinas, que al tener un porcentaje de bloque grande como es 36% y una frecuencia alta de automóviles llegando al sistema, el impacto en la cola fue considerable llegando a ser el más alto del sistema.

Cómo vimos, la calle Jr. Amazonas 3 es la que mayor porcentaje de utilización tiene, y en su semáforo se puede ver la razón, no solamente tiene un porcentaje muy elevado de operación 94% sino que también cuenta con un porcentaje de bloqueo del 4%, este porcentaje así se mínimo, repercutió en las calles que la antecedieron siendo la principal afectada la calle Jr. 5 esquinas que tiene mayor llegada de vehículos y el tramo Jr. Amazonas 2 que tuvo un porcentaje de bloqueo elevado, y el porcentaje de utilización aumentó llegando a casi el 80% de la capacidad del tramo.

3.3.2.3. Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 2.

El tiempo de permanencia en el sistema también se redujo para los automóviles que ingresaron, todos a excepción de aquellos que ingresaron por el Jr. 5 esquinas (Tabla 34)

Tabla 34: Indicadores para los automóviles – Escenario propuesto 2

Semáforo	Tiempo en sistema promedio (seg.)	Tiempo en operación promedio (seg.)	Tiempo detenido promedio (seg.)
Auto Jr. Amazonas 1	220.6	92.3	128.3
Auto Jr. 5 esquinas	349.6	78.0	271.6
Auto Jr. Urrelo subida	106.0	59.0	47.1
Auto Jr. Urrelo bajada	120.2	69.5	50.7
Auto Jr. Belén	156.8	94.8	62.0
Auto Jr. 2 de Mayo	62.7	36.2	26.5

FUENTE: Elaboración propia.

El tiempo en operación promedio siguió siendo el mismo, aunque con mínimas variaciones, pero el tiempo total en el sistema si cambió por lo que se presenta la información en porcentajes en la Tabla 35.

Tabla 35: Porcentajes de operación para los automóviles - Escenario propuesto 1

Automóvil	Tiempo en operación promedio (%)
Auto Jr. Amazonas 1	42
Auto Jr. 5 esquinas	22
Auto Jr. Urrelo subida	55
Auto Jr. Urrelo bajada	57
Auto Jr. Belén	61
Auto Jr. 2 de Mayo	57
PROMEDIO	49

FUENTE: Elaboración propia.

El tiempo de operación más bajo fue el del auto que ingresa por el Jr. 5 esquinas, esto debido a que es la calle más crítica para esta propuesta, sólo el 22% del tiempo en el sistema se mantuvo en movimiento, es decir la quinta parte.

3.3.2.4. Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 2.

Para las variables de conteo, también se redujeron los tiempos en que los automóviles hacen el recorrido total hasta llegar a la última calle que es Jr. Amazonas. Estos tiempos son los mostrados en la Tabla 36.

Tabla 36: Indicadores para la variable de conteo – Escenario propuesto 2.

Variable de Conteo	Valor Mínimo (seg)	Valor Máximo (seg)	Valor Promedio (seg)	VALOR IDEAL (seg)
Tiempo de ciclo Auto Amazonas	138.7	440.2	293.8	132
Tiempo de ciclo Auto 5 Esquinas	171.6	869.8	462.6	137
Tiempo de ciclo Auto Urrelo Bajada	123.5	256.8	193.9	105
Tiempo de ciclo Auto Urrelo Subida	136.6	235.2	185.8	113
Tiempo de ciclo Auto Belén	113.9	240.0	175.0	111

Variable de conteo	Valor Mínimo (seg)	Valor Máximo (seg)	Valor Promedio (seg)	VALOR IDEAL (seg)
Tiempo de ciclo Auto 2 de Mayo	74.8	152.7	114.2	65

FUENTE: Elaboración propia

Se puede apreciar que la reducción del tiempo afectó a todos los automóviles a excepción del automóvil de la calle Jr. 5 esquinas. Su promedio aumentó de 360 segundos a 462 segundos, y durante la simulación hubo al menos un automóvil que le tomó 870 segundos hacer todo el recorrido, es decir hizo 730 metros en 14 minutos y medio.

Presentados estos indicadores del escenario dos, podemos ver que, si se eligiese esta opción, el sistema tendría más fluidez en comparación a la situación actual. Pero, tendríamos que destinar una calle a mucho congestionamiento como se pudo apreciar en el Jr. 5 esquinas, que dado a su interllegada y a que es una de las calles alimentadores que está al comenzar el recorrido, el impacto de los bloqueos y congestionamiento de las siguientes calles hace que todos sus indicadores sean elevados. Por tal razón, y teniendo en cuenta lo expuesto en la parte teórica acerca de la simulación, este escenario previno el impacto de implementar estos tiempos de programación en los semáforos y provocar lo ya mencionado en la calle Jr. 5 esquinas.

Entre los dos escenarios propuestos, se pudo ver que el primero es el que mejor se adecúa para cumplir el objetivo de la investigación, ya que no sólo permitió la reducción de todos los indicadores de congestionamiento, sino que también permitió tener un porcentaje de capacidad disponible por si el sistema recibía automóviles con más frecuencia; en cuanto al segundo escenario, los indicadores

obtenidos también fueron menores en cuanto a la situación inicial, sin embargo una calle presentó colas muy largas que, de replicarse este modelo en la vida real, sería inviable ya que no se podría sacrificar una calle para que todas las demás funcionen correctamente.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

El trabajo de investigación persiguió el objetivo principal de realizar un modelo de simulación que represente el comportamiento de los automóviles en una vía de la ciudad, con el fin de, con la reprogramación de semáforos, disminuir la congestión vehicular. Diferentes investigaciones abordan el tema de simulación como una herramienta eficaz para resolver problemas, grandes o pequeños, de una forma segura y económica. Como describen en su investigación los autores (Claudia Díaz & Deysi Arribasplata, 2016) (Sergio Fernández, Lionel Montoya & Liliana Portilla, 2011) en situaciones cotidianas como la creación de colas en una estación de servicios, la simulación llega a posicionarse como una de las mejores alternativas para mejorar las condiciones del sistema. Esto quedó demostrado ya que el transitar por una calle con alta congestión se ha vuelto algo de todos los días, e incluso uno llega a acostumbrarse y hacer que parezca normal, pero con un estudio adecuado, de manera específica al problema, esta congestión puede disminuirse.

Los indicadores de la situación actual del sistema muestran que en pocos tramos de una calle altamente transitada se puede generar gran congestión, teniendo un tramo de la calle principal con 89% de utilización, lo que genera que existan bloqueos y repercutan en formaciones de grandes colas como sucede en el Jr. 5 esquinas, con un promedio de 22 automóviles que es aproximadamente toda una cuadra o más. Para solucionar este problema, el uso de un simulador como ProModel ayuda a saber qué pasa si los elementos manipulables del sistema, como los semáforos, son modificados; también sirve para simplificar las cosas de cara al análisis de la situación actual; como

concluye (Edgar Gómez, 2009) en su investigación, una buena representación de la realidad permite evaluar la sincronización de los semáforos, el funcionamiento del sistema y proponer correcciones.

En cuanto a los dos escenarios propuestos, en el segundo, que implica replicar el efecto de la ola verde, existe una discordancia con lo planteado por los autores (Sergio Fernández, Lionel Montoya & Liliana Portilla, 2011), quienes en su estudio plantean que este efecto sí es útil para mejorar la movilidad de un circuito de múltiples intersecciones con semáforos en línea. Con el escenario propuesto 1 quedó demostrado que es mejor un análisis independiente de cada una de las intersecciones del sistema vial para tratar el congestionamiento, que aplicar la ola verde a todo el sistema.

Al aplicar la simulación para encontrar mejoras en cuanto al congestionamiento, se evidenció lo acotado (por Taha, 2012), cuando menciona que la simulación no es una técnica de optimización; existe concordancia con esto ya que, si bien no se pudo llegar a un punto óptimo, el uso de la simulación sirvió para analizar los indicadores de congestión arrojados por el sistema y elegir el mejor escenario.

Finalmente, en lo que respecta al orden de las calles que se ve afectado por el congestionamiento vehicular, se está de acuerdo con lo expuesto por (Ariany Paredes & Rosita Tirado, 2016) quienes plantearon un estudio para reducir la capacidad ociosa de los vehículos en las calles a través de la programación binaria, programando una oferta de una línea de transporte público más acorde a su demanda, las autoras concluyen que los estudios realizados para el mejoramiento de estos temas de ordenamiento vial realmente serían funcionales y significativos si se cuenta con la atención debida de las autoridades locales pertinentes de la ciudad.

Para futuros estudios, esta investigación puede ser replicada en otros tramos de la ciudad, y puede ir dirigida no sólo a una calle principal, sino también a intersecciones entre avenidas o calles con varios carriles, donde comúnmente se aprecia mayor congestión.

La importancia de la investigación radica en que se demostró que la técnica de la simulación permitió disminuir los indicadores de congestión vehicular, sin la necesidad de tomar el riesgo de hacer las pruebas de manera directa. Y esto, a su vez, permite la mejora de la fluidez en el tránsito vehicular, y la comodidad tanto de peatones como conductores.

4.2. Conclusiones

Luego de haber realizado y modelado las propuestas de mejoras para una vía en la ciudad de Cajamarca, se concluyó lo siguiente.

- Se logró diseñar un modelo de simulación con la ayuda del software ProModel, lo que permitió realizar un análisis de la situación actual del sistema vial y sus indicadores de congestiónamiento.
- Se desarrolló escenarios de mejora respecto a los indicadores obtenidos de ProModel para la situación actual del sistema vial. Se ingresó la información correspondiente a ProModel y se hizo corridas de los nuevos escenarios de reprogramación de los tiempos de los semáforos.
- Se analizó los resultados de los nuevos escenarios simulados en relación con el congestiónamiento vehicular.

REFERENCIAS

- Amaya, A. J. (2009). *Toma de decisiones gerenciales: Métodos cuantitativos para la administración (2a. ed.)*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Arribasplata D. & Díaz C., (2016) *Influencia de un sistema de simulación aplicando la teoría de colas en el área de consultorios externos en el hospital regional de Cajamarca, para reducir tiempos de espera*. Cajamarca – Perú. Universidad Privada del Norte.
- Baca, U. G. (2013). *Evaluación de proyectos (7a. ed.)* McGraw-Hill Interamericana.
- Fernández S., Arias L., Portilla L., (2011) Análisis de una zona de confluencia de un sistema vial a través de modelos de simulación: Un caso en particular. Redalyc N°7. Recuperado desde: www.redalyc.org
- Gallagher, C., & Watson, H. (1982). *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones en administración*. McGraw-Hill Interamericana.
- García E., García H., Cárdenas L. (2013) *Simulación y análisis de sistemas con ProModel (2ª ed.)*. Pearson, México.
- González, A. Á. L., & García, L. G. (2015). *Manual práctico de investigación de operaciones I (4a. ed.)* Universidad del Norte, Colombia.
- Gómez H. (2009). *Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la mejora en la sincronización de semáforos*. Puebla - México. INAOE.
- Guido J. (2015) *Optimización del ciclo semafórico en intersecciones congestionadas a nivel microscópico*. Lima – Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.

Hillier F. S., Lieberman G. J. (2010) *Introducción a la Investigación de Operaciones* (9ª ed.), McGraw-Hill / Interamericana.

Lema C., Pedreira L., Bouza G., Allende S., (2009) *Estudio de la optimización del Tráfico en un cruce a través del ajuste de los ciclos de los semáforos mediante Recocido simulado*. La Habana – Cuba. Universidad de La Habana.

Mathur K., Solow D. (1996) *Investigación de Operaciones. El Arte de la Toma de Decisiones*. Prentice-Hall / Hispanoamericana.

Moreno, P. J. (2015). Programación orientada a objetos. RA-MA. España.

Paredes A., & Tirado R. (2016). *Impacto de un modelo de programación binaria para optimizar la programación de la línea 57 Empresas de Transporte y Servicios Múltiples Jerusalén SRL en la ciudad de Cajamarca*. Cajamarca – Perú. Universidad Privada del Norte.

Peraza G. (2013) *Introducción a la teoría de colas y su simulación*. Universidad de Sonora, México.

Piera M., Guash T., Casanovas J., Figueras J., (2006) *Cómo mejorar la logística de su empresa mediante la simulación*. Ediciones Díaz de Santos – Madrid.

Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías (2014) *Texto Único Ordenado del Reglamento Nacional de Tránsito – Código de Tránsito Decreto Supremo N.º 016-2009-MTC*. Perú.

Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones* (9a. ed.), Pearson Educación, México.

Urquía A., Martín C. (2016) *Métodos de simulación y modelado*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.

ANEXOS

Anexo N°1: Validación del instrumento.

Diseñado por José Luis Ventura-León

FORMATO DE VALIDEZ BASADA EN EL CONTENIDO: GUIA DE ENTREVISTA

Estimado(a) experto(a):
Reciba mis más cordiales saludos, el motivo de este documento es informarle que estoy realizando la validez basada en el contenido de un instrumento destinado a medir la CONGESTIÓN VEHICULAR EN UN SISTEMA VIAL. En ese sentido, solicito pueda evaluar los siguientes ítems en dos criterios: Coherencia y claridad. Su sinceridad y participación voluntaria me permitirá identificar posibles fallas en la escala.

Antes es necesario completar algunos datos generales:

I. Datos Generales

Nombre y Apellido:	<i>Ricardo Fernando Ortega Mestanza</i>		
Grado académico:	Bachiller	Magister <input checked="" type="checkbox"/>	Doctor
Área de Formación académica	<i>Ingeniería Industrial</i>		
Áreas de experiencia profesional	<i>Gestión / Investigación / de Operaciones. Sin.</i>		
Tiempo de experiencia profesional en el área	2 a 4 años	5 a 10 años <input checked="" type="checkbox"/>	10 años a más

II. Criterios de Calificación

a. Coherencia

El grado en que el ítem guarda relación con la dimensión que está midiendo. Su calificación varía de 0 a 3: El ítem "No es coherente para evaluar" (puntaje 0), "poco coherente para evaluar" (puntaje 1), "coherente para evaluar" (puntaje 2) y es "totalmente coherente para evaluar" (puntaje 3).

<i>Nada coherente</i>	<i>Poco coherente</i>	<i>Coherente</i>	<i>Totalmente coherente</i>
0	1	2	3

b. Claridad

El grado en que el ítem es entendible, claro y comprensible en una escala que varía de "Nada Claro" (0 punto), "medianamente claro" (puntaje 1), "claro" (puntaje 2), "totalmente claro" (puntaje 3)


<i>Nada claro</i>	<i>Poco claro</i>	<i>Claro</i>	<i>Totalmente claro</i>
0	1	2	3

Diseñado por José Luis Ventura-León

N°	ÍTEMES	Citas bibliográficas	Coherente				Claridad				Sugerencias
			0	1	2	3	0	1	2	3	
	Ponderación										
	Ítems										
1	¿Cuánto es la cantidad de cola promedio en cada calle?	Basado en: Hillier y Lieberman, 2010. Mathur, 1996.			/				/		
2	¿Cuántos segundos duran las fases de los semáforos?				/				/		
3	¿Cuánto duran los desfases entre semáforos?				/				/		
4	¿Cuál es la interlegada promedio de los vehículos a las calles del sistema?				/				/		
5	¿Con cuántas calles alimentadoras cuenta el sistema?				/				/		
6	¿Con cuántas calles principales cuenta el sistema?				/				/		
7	¿Cuál es el tiempo promedio de un automóvil en la cola de espera?				/				/		
8	¿Cuál es el recorrido que hacen los automóviles en el sistema?				/				/		
9	¿Cuál es el porcentaje de entrada y salida de los automóviles al cruzar de una calle a otra?				/				/		
10	¿Con cuántas intersecciones semaforizadas cuenta el sistema?				/				/		
11	¿Cuántos elementos como máximo permite modelar la versión a utilizar del software?				/				/		
12	¿Cuánto es el tiempo promedio que dura un automóvil en el sistema?				/				/		
13	¿Cuál es la longitud y capacidad de cada tramo del sistema?				/				/		
14	¿Cuánto es el tamaño promedio de un automóvil?				/				/		
15	¿Cuál es la velocidad promedio en que circulan los automóviles?				/				/		

alternativas de respuesta van de 0 al 3 y tienen las siguientes expresiones:

0 1 2 3
Muy en desacuerdo Desacuerdo De acuerdo Muy de acuerdo


Firma y Sello
Ing. Fernando Ortega M.

Las