

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA**  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
**DEL PERÚ**

**APLICABILIDAD DE LA TRANSFORMADA DE WHITING PARA  
DETERMINAR COLAS EN UNA INTERSECCIÓN  
SEMAFORIZADA DE LA CIUDAD DE LIMA.**

Tesis para optar el título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

**Abel Enrique Ramirez Dipas**

**Asesor: MSc. Félix Israel Cabrera Vega**

Lima, agosto 2019

## Dedicatoria



A *DDT* por enseñarme a soñar.

A *FCV* por sus consejos de vida.

A mis amigos, por alimentarme  
con sus vivencias.

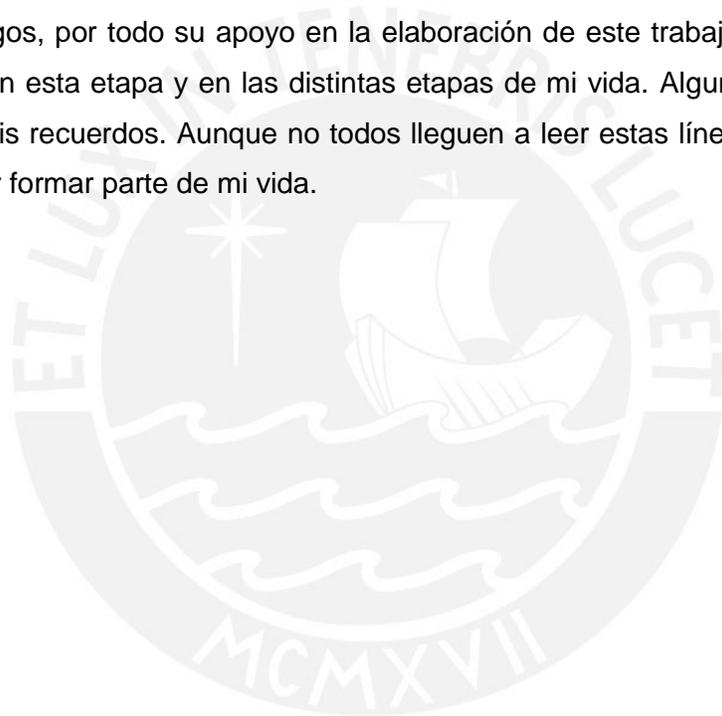
## Agradecimientos

A mi asesor el ingeniero Félix Cabrera, por su guía, paciencia, tiempo y consejos. Siempre atesoraré las charlas que sostuvimos durante todo el proceso de elaboración de este trabajo.

A mis padres, por su constante apoyo y consejos; siempre serán fortaleza en medio de situaciones difíciles.

A ti Sandra, por tu cariño y todos aquellos momentos en los que supiste llegar con las palabras adecuadas.

A mis amigos, por todo su apoyo en la elaboración de este trabajo, su comprensión y consejos en esta etapa y en las distintas etapas de mi vida. Algunos están conmigo y otros en mis recuerdos. Aunque no todos lleguen a leer estas líneas, quiero darles las gracias por formar parte de mi vida.



## Resumen

En áreas urbanas la congestión vehicular se produce, generalmente, en las intersecciones. Esta es producto de los conflictos direccionales entre vehículos con destinos distintos, el espacio limitado para su desplazamiento además de un mal hábito generalizado entre conductores y peatones para su desplazamiento. Todo esto generará distintas condiciones desfavorables a nivel de tráfico vehicular, entre las cuales se encuentran las demoras y longitudes de cola; las cuales tienen como consecuencia directa la disminución de la capacidad vial e inducen a un comportamiento caótico por parte de los usuarios.

Por ello la demora y la longitud de cola vehicular son algunos de los parámetros más importantes usados en la ingeniería de tráfico, debido a que permiten cuantificar el desempeño de los desplazamientos en una intersección, especialmente en las semaforizadas. La importancia de ambos parámetros se refleja en su uso en el diseño y el análisis de intersecciones. Además, ambos pueden ser parte de la información fundamental en estimación de tiempos de viaje y confiabilidad de la red para el diseño y planificación de zonas urbanas (Viti & Van Zuylen, 2010).

Por lo dicho anteriormente, se considera importante desarrollar una investigación que este orientada al estudio de intersecciones semaforizadas y por ello, el presente trabajo estudia la longitud de colas mediante el uso de la expresión transformada de Whiting.

Como parte de la revisión de la literatura se detallan los conceptos asociados al uso de dicha transformada, su concepción y los parámetros a usar para la obtención de resultados. Así mismo, con la filmación realizada se obtendrán y analizarán las longitudes de cola excedentes que se producen en los accesos cercanos a una intersección para de esta manera evaluar la validez de la transformada mediante la comparación de los valores obtenidos mediante su aplicación y los medidos en campo.

Finalmente, este trabajo se presenta con la finalidad de obtener una expresión concisa y sencilla que sea capaz de brindar valores similares a los medidos en campo.

## Índice

Lista de Figuras .....	v
Lista de Tablas .....	vi
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivo Especifico .....	2
1.3. Hipótesis.....	3
Capítulo 2. Revisión de la literatura .....	4
2.1. Fundamentos de semaforización.....	4
2.2.1. Conceptos básicos de semaforización .....	4
2.2. Tipos de intersecciones.....	6
2.2.1 Definición de Intersección .....	6
2.2.2. Demanda .....	6
2.2.3. Capacidad .....	7
2.2.4. Grado de saturación y flujo de saturación .....	7
2.3. Definición de cola .....	10
2.3.1. Componentes del sistema de una cola .....	11
2.3.2. Notación de Kendall.....	11
2.3.3. Medidas de desempeño o eficiencia en el estado de una cola.....	12
2.3.4. Sistema M/M/1 (Distribución de Llegadas Poisson/ Tiempo de servicio con distribución exponencial/ Un solo servidor) .....	13
2.4. Transformada de Whiting .....	15
2.4.1. Definiciones asociadas .....	15
2.4.2. Concepción de la función transformada .....	17
2.4.3. Consideraciones para su planteamiento .....	22
2.4.4. Procedimiento para su modelamiento .....	22
2.4.5. Indicadores del estado de una cola.....	25
2.4.6. Componente uniforme de la demora .....	27
2.4.7. Componente excedente asociado a la demora incremental .....	30
2.4.8. Demora total .....	32
2.5. Tipos de colas en una intersección semaforizada .....	33
Capítulo 3. Metodología.....	38
3.1 Selección de la intersección a analizar.....	38

3.2 Descripción de la zona de trabajo .....	40
3.3 Toma de datos .....	41
3.4. Tiempos del semáforo .....	43
3.5. Cálculo de la cola excedente.....	43
3.6. Cálculo de la Capacidad.....	44
3.7. Calculo de la demanda y el grado de saturación .....	45
Capítulo 4. Recolección de información y procesamiento de datos .....	46
4.1. Ciclos y tiempos del semáforo.....	46
4.2. Flujo de saturación.....	49
4.3. Demanda .....	55
4.4. Cola excedente .....	55
Capítulo 5. Análisis de resultados.....	57
5.1. Demanda, capacidad y grado de saturación.....	57
5.2. Parámetros para el cálculo de la cola excedente.....	58
5.2.1 Parámetros $X_0$ y $Q_t$ .....	58
5.3. Parámetros para el cálculo de la cola excedente.....	60
5.4. Flujo de saturación.....	67
5.5. Demanda, Capacidad y Grado de Saturación .....	68
5.6. Máxima cantidad de vehículos, cola excedente y cola medida en campo .....	70
6. Conclusiones .....	73

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama de descarga de un intervalo verde saturado. ....	9
<b>Figura 2.</b> Sistema de cola del tipo M/M/1. ....	13
<b>Figura 3.</b> Longitudes de colas en función del grado de saturación. ....	20
<b>Figura 4.</b> Método de transformación de coordenadas. ....	21
<b>Figura 5.</b> Modelos de longitud de cola en función del grado de saturación.....	24
<b>Figura 6.</b> Indicadores del estado de una cola.....	25
<b>Figura 7.</b> Relación entre llegadas, salidas, longitud de cola y retraso total en intersecciones semaforizadas no saturados con llegadas y salidas uniformes. ....	28
<b>Figura 8.</b> Componentes de la demora promedio. ....	33
<b>Figura 9.</b> Magnitudes existentes de colas en los semáforos.....	34
<b>Figura 10.</b> Magnitudes de la cola excedente. ....	36
<b>Figura 11.</b> Esquema de la intersección de las avenidas La Mar y Universitaria.....	39
<b>Figura 12.</b> Intersección Semaforizada Universitaria – la Mar (orientación Sur - Oeste). ....	40
<b>Figura 13.</b> Intersección Semaforizada Universitaria – La Mar (Orientación Sur - Este). ....	41
<b>Figura 14.</b> Ubicación de las Cámaras y su campo de visión ....	42
<b>Figura 15.</b> Fase 1 del semáforo ubicado en la avenida La Mar con sentido hacia el Parque de las Leyendas. ....	47
<b>Figura 16.</b> Fase 2 del semáforo ubicado en la avenida La Mar con sentido hacia la avenida Sucre.....	47
<b>Figura 17.</b> Fase 3 del semáforo ubicado en la avenida Universitaria con sentido hacia la Universidad Católica. ....	47
<b>Figura 18.</b> Fase 4 del semáforo ubicado en la avenida Universitaria con sentido hacia la Avenida la Marina. ....	47
<b>Figura 19.</b> Gráfica de intervalos de tiempo versus número de vehículos. Acceso La Mar hacia el parque de las Leyendas. ....	51
<b>Figura 20.</b> Cola excedente. Rumbo: La mar hacia parque de las leyendas. ....	56
<b>Figura 21.</b> Cola excedente. Rumbo: La mar hacia avenida Sucre.....	56
<b>Figura 22.</b> Acceso La Mar – Parque de las Leyendas 15 primeros minutos ....	61
<b>Figura 23.</b> Tiempo de cruce por vehículo entre 15 y 30 minutos ....	61
<b>Figura 24.</b> Acceso: la Mar – Parque de las Leyendas. Toma de datos entre 30 y 45 minutos. Fuente: Elaboración Propia. ....	62
<b>Figura 25.</b> Acceso: la Mar – Parque de las Leyendas. Toma de datos entre 45 y 60 minutos. Fuente: Elaboración Propia. ....	62
<b>Figura 26.</b> Acceso: la Mar – Avenida Sucre. Toma de datos 15 primeros minutos. Fuente: elaboración propia ....	64
<b>Figura 27.</b> Acceso: la Mar – Avenida Sucre. Toma de datos entre 15 y 30 minutos. Fuente: elaboración propia ....	64
<b>Figura 28.</b> Acceso: La Mar – Avenida Sucre. Toma de datos entre 30 y 45 minutos. ...	65
<b>Figura 29.</b> Acceso: La Mar – Avenida Sucre. Toma de datos entre 45 y 60 minutos. ...	65
<b>Figura 30.</b> Comparación entre longitud de cola medida y calculada.....	71
<b>Figura 31.</b> Comparación entre longitud de cola medida y calculada.....	72

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Notaciones de Kendall empleadas para tres de los componentes de una línea de espera.....	12
<b>Tabla 2.</b> Tiempo que le toma a cada vehículo cruzar la línea de parada. ....	51
<b>Tabla 3.</b> Flujo de saturación para los primeros quince minutos para cada acceso.....	53
<b>Tabla 4.</b> Demanda cada 15 minutos por acceso.....	55
<b>Tabla 5.</b> Demanda, capacidad y grado de saturación. Acceso La Mar hacia parque de las leyendas.....	57
<b>Tabla 6.</b> Demanda, capacidad y grado de saturación. Acceso La Mar hacia avenida Sucre. ....	57
<b>Tabla 7.</b> Información obtenida para el cálculo de la cola excedente. Acceso La Mar avenida Sucre.....	58
<b>Tabla 8.</b> Cálculo de cola excedente. Acceso La Mar hacia avenida Sucre .....	59
<b>Tabla 9.</b> Cálculo de cola excedente. Acceso La Mar hacia avenida Sucre .....	59
<b>Tabla 10.</b> Información obtenida para el Cálculo de la cola excedente. Acceso la Mar hacia Parque de las Leyendas.....	59
<b>Tabla 11.</b> Cálculo de la cola excedente. Acceso La Mar hacia parque de las leyendas. ....	59
<b>Tabla 12.</b> Cálculo de la cola excedente. Acceso La Mar hacia parque de las leyendas. ....	60
<b>Tabla 13.</b> Flujos de saturación en cada periodo de tiempo y por acceso. ....	67
<b>Tabla 14.</b> Parámetros para el cálculo de la cola excedente por acceso.....	68
<b>Tabla 15.</b> Máxima cantidad de vehículos que abandonan el acceso, Cola Excedente teórica y cola excedente medida en campo. ....	70

## **Capítulo 1. Introducción**

Actualmente, de acuerdo con las estadísticas del ministerio de transportes y comunicaciones (MTC, 2015), el parque automotor de Lima y Callao se ha incrementado de 885,636.00 unidades en el año 2005 a 1'590,755.00 unidades en el año 2014. Esto, en una ciudad como Lima, conlleva al incremento de la congestión vehicular. Además, este crecimiento del parque automotor, implica transformaciones negativas en la ciudad sobre todo en los dispositivos viales como las vías, intersecciones y estaciones. Es por ello que se requiere de un sistema o metodología para cuantificar y evaluar la eficiencia de dichos dispositivos, los cuales, debido a que poseen dimensiones finitas porque pertenecen a un espacio público determinado, tienen una capacidad de atención limitada Fernández (2011). Expresado en otras palabras, estos dispositivos viales solo podrán atender de manera eficiente un número limitado de vehículos debido a las limitaciones físicas del propio elemento. Este es el caso de un acceso cercano a una intersección semaforizada, en el cual, en determinados periodos de tiempo, se originarán colas y demoras asociadas al aforo vehicular siendo ambas las principales causas que originarán detenciones, lo cual se asocia con pérdida de tiempo, combustible, contaminación y un desgaste mecánico.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible analizar estos efectos mediante el uso adecuado de modelos estadístico - matemáticos que ayuden a cuantificar longitudes de colas, demoras y las diferentes magnitudes de colas que puedan generarse en un acceso cercano a una intersección semaforizada.

En la presente investigación se analizará el desempeño de una intersección semaforizada en la ciudad de Lima mediante el uso de la transformada de Whiting y a través de mediciones de campo se evaluará la aplicabilidad de dicha transformada en un espacio público dentro de la Ciudad de Lima.

## **1.1. Planteamiento del problema**

En las últimas décadas, el uso cada vez más difundido del automóvil entre la población; la inacción por parte de los municipios en lo que a mantenimiento periódico vial se refiere, y como consecuencia el deterioro de la misma; además, de una casi inexistente cultura vial han desencadenado en niveles de congestión vehicular alarmantes a tal punto que la denominada “hora punta” ha dejado de ser un periodo de tiempo asociado a un momento específico del día para producirse en cualquier momento y en cualquier punto de la ciudad.

Esta problemática ha generado que en los últimos años se planteen diferentes alternativas para menguar los efectos producidos por la congestión vehicular tales como la pérdida de combustible, demoras en el tiempo de viaje, contaminación por altas emisiones de gases de efecto invernadero, desgaste de los vehículos así como también el estrés que genera todo esto en los usuarios.

Por ello es necesario conocer que modelos permiten cuantificar adecuadamente los parámetros de eficiencia en intersecciones semaforizadas tales como longitud de colas y demoras para que con esta información se pueda desarrollar propuestas de diseño y planificar las zonas urbanas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Analizar el comportamiento de una intersección semaforizada en Lima mediante modelos determinísticos.

### **1.2.2. Objetivo Especifico**

Evaluar si la función derivada a partir de la transformada de Whiting, aplicada al caso de una intersección semaforizada en Lima, brinda valores aceptables de longitud de colas. Además, estudiar la variación del parámetro denominado flujo de saturación en cada acceso de la intersección semaforizada.

### **1.3. Hipótesis**

La formulación teórica de Whiting no ofrece resultados adecuados cuando se producen altos niveles de congestión en un acceso cercano a una intersección semaforizada.

### **1.4. Limitaciones y alcances del proyecto**

#### **1.4.1. Alcances**

En el presente trabajo se obtendrá, en base a recolección de datos en el campo y al uso de la expresión teórica de Whiting, la longitud de cola vehicular, demanda y cola excedente que se genera en una intersección semaforizada en la ciudad de Lima. La longitud de cola vehicular medida en el campo será comparada con la información que se obtenga mediante el empleo de la función transformada.

#### **1.4.2 Limitaciones**

En la ciudad de Lima, la congestión vehicular originada por el incremento sostenido a lo largo de los años de vehículos de transporte público tales como custers, combis, microbuses, y considerando que una gran cantidad de estos son informales, contribuye a generar en los conductores, tanto de vehículos de transporte público como privado, distintos tipos de comportamientos tan variados como el número de usuarios.

Por ello, los resultados que se mostrarán en este trabajo se asocian directamente a este comportamiento y es debido a esto que dichos resultados pueden variar ya que dependen del lugar en donde se realice el estudio.

La determinación del parámetro denominado flujo de saturación es un aspecto a estudiar en este trabajo y esto debido a que además de estar directamente vinculado a la forma de manejo que poseen los usuarios también se ve afectado por la cantidad de vehículos de transporte público, el comportamiento de los peatones y la geometría de la intersección analizada.

## Capítulo 2. Revisión de la literatura

### 2.1. Fundamentos de semaforización

Los semáforos son dispositivos complejos que pueden operar en una variedad de formas (Roess, et al., 2011). Estos son dispositivos de control que, por medio de luces, regulan el movimiento de vehículos y peatones. La función de un semáforo es permitir el paso, de manera alternada, de los vehículos que provienen de dos o más accesos, ya que estos convergerán en una intersección. De esta manera, se garantizará que el uso seguro y ordenado del espacio disponible Cal y Mayor (1996).

#### 2.2.1. Conceptos básicos de semaforización

A continuación se realizara la definición de algunos términos importantes relacionados con el semáforo.

- **Ciclo**

Es el tiempo necesario para que se realice una sucesión completa de todos los indicadores, señales o luces dados por el semáforo. Akcelik (1981).

- **Longitud de ciclo**

Es el tiempo medido en segundos que se requiere para completar todos los movimientos en la intersección.

- **Intervalo**

Es el periodo de tiempo en el cual el semáforo no ejecuta cambios de indicación; en otras palabras, el periodo en el cual solo exhibe una indicación determinada Radelat (1964). Este representa la unidad de tiempo más pequeña dentro del ciclo de un semáforo.

- **Intervalo rojo**

Indica que los vehículos que se encuentre dentro de este intervalo deberán detenerse y permanecer en ese estado hasta el cambio de señal. Es por ello que todo movimiento dentro de este intervalo se considera como no permitido. Este intervalo se representa por el símbolo " $R_i$ " para movimientos " $i$ ".

- **Intervalo verde**

Durante este intervalo, los vehículos podrán desplazarse y podrán seguir haciéndolo hasta el cambio de señal. Mientras este intervalo se lleve a cabo, los movimientos permitidos tendrán luz verde mientras que todos los otros movimientos tendrán una luz roja. Se representa por el símbolo " $G_i$ ".

- **Intervalo amarillo o de cambio**

Es la señal amarilla para un determinado movimiento. Se le denomina también intervalo de transición debido a que marca el paso o cambio de la señal verde a rojo. Dentro de este intervalo se le asignará la señal amarilla a los movimientos que tengan luz verde mientras que los otros tendrán una luz roja.

- **Movimiento**

Hace referencia a la trayectoria que realiza un grupo de vehículos (desde un origen hacia un destino). Dentro de su trayecto tienen como punto de paso a un dispositivo vial. (Vía, intersección, rotonda).

- **Fase**

Es aquel periodo de tiempo dentro del ciclo para el cual se le otorga el derecho de paso a uno, dos o una combinación de movimientos durante uno o más intervalos Radelat (1964). Se puede identificar a una fase cuando al menos un movimiento adquiere el derecho de paso al inicio de la fase y por lo menos un movimiento lo pierde al final de la misma Akcelik. (1981).

- **Tiempo perdido**

Periodo de tiempo durante el cual el dispositivo vial no es utilizado por ningún movimiento; este tiempo ocurre durante el intervalo de cambio y al inicio de cada fase.

- **Verde efectivo**

Es el tiempo, durante una fase determinada, en el cual el verde está disponible para los movimientos permitidos. Este se considera como el tiempo de verde más el intervalo de cambio menos el tiempo perdido para la fase en análisis. Se representa por el símbolo " $g_i$ " para la fase " $i$ ".

- **Proporción de verde efectivo**

Es la razón entre el verde efectivo y la duración del ciclo. Se representa con el símbolo " $g_i/C$ ".

Los conceptos desarrollados anteriormente son aplicables a las intersecciones cuando estas están gobernadas por un semáforo. Por ello a partir de este punto se procederá a detallar brevemente los distintos tipos de intersecciones.

## **2.2. Tipos de intersecciones**

Existen diferentes tipos de intersecciones. Sin embargo, en este trabajo solo se hará énfasis en la intersección semaforizada.

### **2.2.1 Definición de Intersección**

Una intersección es un área común en la cual dos o más vías se cruzan y cuya función es permitir el cambio de dirección de una ruta. Es por ello que, en este tipo de dispositivo vial, la circulación de vehículos podría estar parcial o completamente interrumpida debido a la alta demanda; Esto, denota la importancia de una intersección dentro de una red vial, por ello deberá de ser sometido a estudio.

#### **2.2.1.1. Intersección no semaforizada**

Es un tipo de intersección en la cual para evitar que se generen conflictos direccionales entre un grupo de vehículos estos deberán cederse el paso de manera alternada o permanente, (Fernández 2011).

#### **2.2.1.2. Intersección semaforizada**

Es un tipo de intersección en la cual el semáforo es el responsable de alternar, de manera cíclica, la prioridad de paso para los vehículos dentro del área común, (Gibson 2001). El semáforo es el responsable de asignar el uso del espacio a los vehículos de manera alternada en el tiempo (Larraín 2012).

### **2.2.2. Demanda**

De acuerdo a Roess, et al., (2011) la demanda se define como el número de vehículos que pasan por un punto durante un periodo de tiempo específico (usualmente una hora).

El Highway Capacity Manual (TRB 2010) afirma que la demanda está relacionada con los vehículos que llegan arriban a la intersección además de ser la medida principal de la cantidad de tráfico generado en un dispositivo vial.

### 2.2.3. Capacidad

El HCM (TRB 2010) define la capacidad de la siguiente manera: “Es la máxima tasa de tiempo en la cual vehículos o personas pueden esperar atravesar un punto o una sección uniforme de un carril o calzada durante un periodo de tiempo dado. Esto bajo las condiciones de control y de tráfico”.

Sin embargo, una manera más sencilla de definirla sería como el número máximo de vehículos, provenientes de una corriente vehicular, que pueden atravesar una intersección; esto en un intervalo de tiempo determinado (Cal y Mayor 1996).

Este número de vehículos depende de diversos parámetros, los cuales pueden ser del tipo variable o fijo, (Radelat, 1964). Entre los parámetros considerados del tipo variable tenemos a los siguientes: el tiempo, tipo de vehículos, el conductor y la geometría de la intersección la cual es considerada como un parámetro fijo.

La capacidad admite un volumen máximo de trabajo para que la intersección sea considerada como eficiente (Roess, et al., 2011).

### 2.2.4. Grado de saturación y flujo de saturación

El **grado de saturación** es definido como la razón entre el flujo y la capacidad. El primero es considerado como la demanda generada por los vehículos al usar un dispositivo vial mientras que el segundo es la oferta de atención que posee tal dispositivo. Bajo la premisa anterior, el grado de saturación muestra el balance entre la oferta y la demanda. Lo definido en el párrafo anterior queda expresado en la siguiente expresión:

$$X = \frac{q}{Q} = \frac{\text{Demanda de tráfico}}{\text{Oferta vial}} \quad (2.1)$$

donde:

$q$ : flujo del transito (veh/h, veq/h, ADE/h)

$Q$ : Capacidad (veh/h, veq/h, ADE/h)

- $V_{eq}$ : Vehículo equivalente el cual corresponde a un vehículo liviano.
- ADE: Automóvil directo equivalente. Cualquier mezcla de vehículos podrá representarse en términos de ADE.

El **Flujo de saturación** ( $S$ ) puede ser descrito como una medida de desempeño en una intersección semaforizada o como un indicador de su capacidad potencial cuando esta opera bajo condiciones ideales (Hadiuzzaman, et al., 2008). Akcelik (1981) menciona que es un parámetro básico para calcular la capacidad de una vía que accede a una intersección semaforizada durante un determinado ciclo "C" de operación de esta. En otras palabras, el flujo de saturación es la tasa máxima de descarga de la cola de vehículos durante el tiempo de verde efectivo. Este parámetro se expresa en unidades de vehículos/ hora.

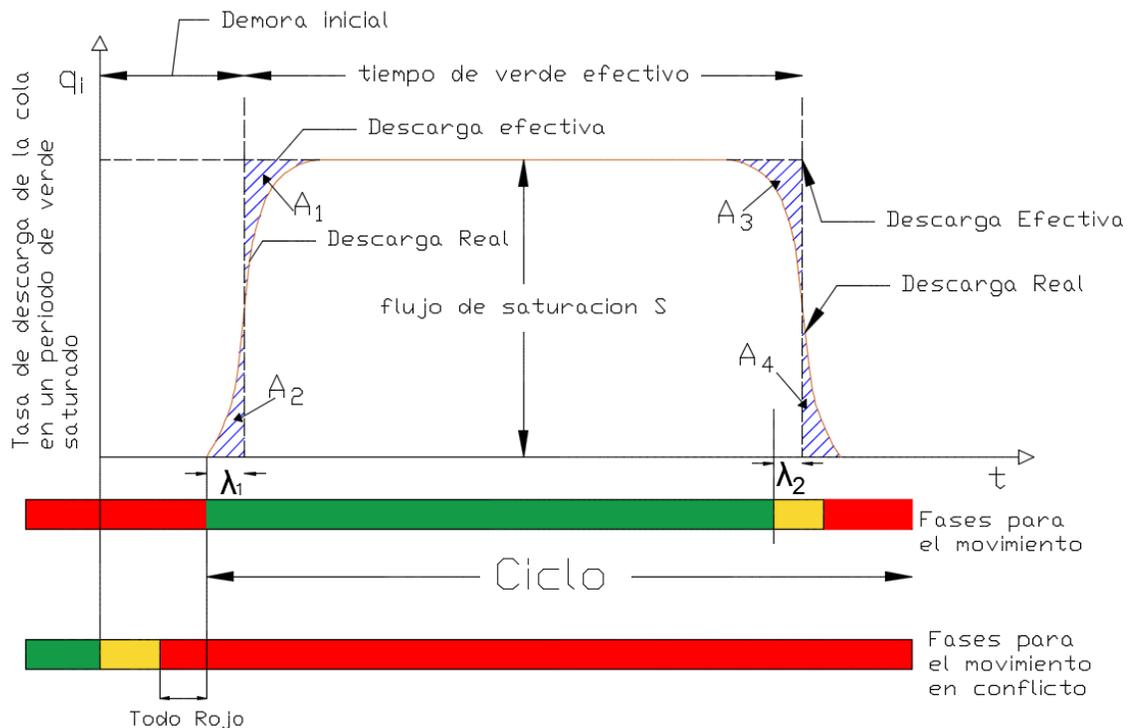
Si en uno de los accesos cercanos, se generara una cola extensa durante un intervalo rojo, de tal manera que el tiempo de intervalo verde no sea suficiente para descargarla totalmente, entonces el flujo de salida de vehículos estará representado por la forma mostrada en la **figura 1**.

En esta figura se puede observar que cuando se inicia el intervalo verde el flujo de vehículos presenta una demora antes de comenzar a desplazarse y cruzar la línea de parada. Esta demora se asocia a que los vehículos incrementan su aceleración desde cero hasta una velocidad constante teniendo en cuenta que no todos los conductores poseen la misma reacción ante el inicio del intervalo verde. A este intervalo de tiempo se le denomina como pérdida inicial ( $\lambda_1$ ). Luego de esta transición, el flujo de vehículos se incrementará rápidamente hasta alcanzar la tasa denominada flujo de saturación ( $S$ ), la cual permanecerá constante hasta que la cola inicial se termine o en todo caso el intervalo de verde termine. Al iniciar el intervalo amarillo, la tasa de salida empezará a decrecer debido a que algunos vehículos se detendrán mientras que otros no lo harán hasta que comience el intervalo rojo periodo durante el cual la tasa de salida será cero. El tiempo de esta transición se denomina ganancia final ( $\lambda_2$ ). Todo el proceso descrito anteriormente se repite cíclicamente en cada descarga.

Las líneas punteadas en la **figura 1** remplazan a la curva de flujo de salida real por un rectángulo de igual área, cuya altura es igual a la del flujo de saturación y cuyo ancho es el tiempo de verde efectivo ( $g$ ). Esta simplificación de la curva de descarga real por un rectángulo de descarga efectiva fue propuesta por Webster y Cobbe. Este consiste en

igualar las áreas superior e inferior ( $A_1$  y  $A_2$ ) al inicio del tiempo perdido y lo mismo ocurre con  $A_3$  y  $A_4$ . Al realizar esto se está suponiendo que durante el tiempo  $\lambda_1$  la descarga será nula (esta es la razón del nombre tiempo perdido), mientras que para el tiempo  $\lambda_2$  la descarga continuará, a pesar de que el intervalo sea el de amarillo. Al realizar esta simplificación se está suponiendo que existe un periodo durante el cual la descarga es nula y otro donde esta sea máxima y constante. Es decir, existe un proceso binario.

El tiempo de verde efectivo ( $g$ ) es igual al intervalo de verde más el tiempo de ganancia final menos el tiempo de pérdida inicial.  $(G) - (\lambda_2) + (\lambda_1)$ . Por ello, el área bajo la curva, del rectángulo, es "sg" y representa al número máximo de salidas en un ciclo.



**Figura 1.** Diagrama de descarga de un intervalo verde saturado.

Fuente: Adaptado de (Akcelick, 1981)

La capacidad depende de la máxima tasa a la que los vehículos pueden salir, es decir el flujo de saturación ( $S$ ), y de la proporción entre el verde efectivo y el tiempo de ciclo. Esto correspondería a calcular el área del rectángulo de descarga efectiva.

$$Q = Sg/C \quad (2.2)$$

Donde Q es la capacidad y cuyas unidades son las mismas que las del flujo de saturación. Esto debido a que el flujo de saturación multiplicado por el verde efectivo (Sg) es la capacidad por unidad de ciclo. Por ello si se desea obtener la capacidad por unidad de tiempo, Sg deberá de ser dividido por el ciclo (C).

Algunas relaciones importantes entre las variables se muestran a continuación.

$$C = G_i + A_i + R_i \quad (2.3)$$

$$g = G_i - \lambda_2 + \lambda_1 \quad (2.4)$$

### 2.3. Definición de cola

Law (2015) describe a un sistema de colas como aquel que posee uno o más servidores que proveen alguna clase de servicio a los clientes que llegan. Si estos clientes encuentran a los servidores ocupados, se agruparán en una o más colas (o líneas) frente al servidor. Es de ahí que a este tipo de arreglos se le denomina sistema de colas o sistemas de líneas de espera.

Existen diversos ejemplos de algunas situaciones que podrían generar colas o líneas de espera. Estas pueden darse cuando el usuario, debe esperar a ser atendido debido a que el responsable de administrar el servicio (servidor) no puede atender, de forma temporal, la demanda a pesar de que pueda estar operando a plena capacidad. Si se traslada la idea anterior a esta investigación, se puede afirmar que debido a la capacidad finita que posee cada dispositivo vial en determinados momentos, dicha capacidad será excedida por el flujo vehicular. Debido a esto los vehículos al no poder acceder a la intersección, deberán detenerse y esperar formando una cola en la que deberán esperar un tiempo adicional al que ya se utilizó para realizar su movimiento.

Por ejemplo, dentro de una intersección, durante el intervalo rojo, la capacidad es nula. Dentro de este periodo de tiempo los vehículos se detienen y forman una cola en el orden de llegada a cada uno de los accesos y esperar el cambio de intervalo a verde hasta que le llegue el turno a cada uno de pasar dentro de este intervalo. Es debido a esto, las demoras, el tamaño de colas y las detenciones, son parámetros que indican cuan eficiente es una intersección.

### 2.3.1. Componentes del sistema de una cola

De manera general, un sistema de colas está compuesto por tres componentes:

- **El proceso de llegada**

El cual consiste en describir la manera en la cual los clientes llegan al sistema.

- **El servicio de atención**

Está compuesto por un número específico de servidores (denotado por la letra  $s$ ), en el cual cada servidor posee su propia cola o, en un caso distinto, si existe una cola común para acceder al servidor o servidores. Además especifica el tiempo que tomará atender a cada cliente.

- **La disciplina de la cola**

La cual hace referencia al orden en el cual el servidor atiende a los clientes. Esta puede ser de tres tipos:

**FIFO** (first-in, first-out) el servicio es brindado por los servidores según el orden de llegada de los clientes. (Por ejemplo la caja de supermercado).

**LIFO** (last-in, first-out) El servidor atenderá primero a los últimos clientes en llegar. (Por ejemplo, Una pila de platos en la cual se guarda primero al último en colocar).

**Prioritario** Se atenderá a los clientes de acuerdo a su orden de importancia o en base a los requerimientos del servicio. (Por ejemplo, el servicio de emergencia en un hospital).

### 2.3.2. Notación de Kendall

En 1953 el matemático David G. Kendall, implementó un tipo de notación que es utilizada en la actualidad para identificar las características de una línea de espera o cola. Esta notación consiste en el uso de Letras separadas entre sí por un slash (/).  $A/B/X/Y/Z$ . Estas variables caracterizan las colas de espera mediante los siguientes elementos:

- (A) hace referencia al tipo o distribución de llegada.
- (B) Naturaleza de los tiempos de servicio.
- (X) número de servidores en paralelo que atienden la misma cola.
- (Y) Número de unidades en el sistema o tamaño de la cola.
- (Z) disciplina de la cola.

La siguiente tabla muestra los diferentes símbolos que se podría usar mediante el uso de la notación de Kendall.

**Tabla 1.** Notaciones de Kendall empleadas para tres de los componentes de una línea de espera.

Fuente: Adaptado de Bronson, (1983).

Características de la línea de espera	Símbolo	Significado
Tiempo entre llegadas o tiempo de servicio	D	Determinístico
	M	Distribuidor exponencialmente
	G	Cualquier otra distribución
Disciplina de la línea de espera	FIFO	Primero en llegar, primero en ser atendido
	LIFO	último en llegar, primero en atenderse
	GD	Se ordenara de acuerdo a prioridades

### 2.3.3. Medidas de desempeño o eficiencia en el estado de una cola

De acuerdo a Taha (2012) las medidas más usadas en un sistema de colas son:

$L_s$  = cantidad espera de clientes en un sistema.

$L_q$  = cantidad esperad de clientes en la cola.

$W_s$  = Tiempo de espera en el sistema

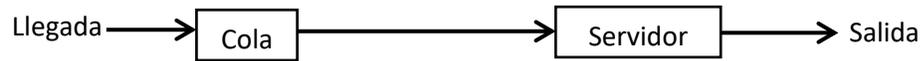
$W_q$  = Tiempo de espera en la cola

$W(t)$  = probabilidad de que un cliente permanezca mas de un tiempo  $t$  en el sistema.

$W_q(t)$  = probabilidad de que un cliente permanezca mas de un tiempo  $t$  en la cola.

### 2.3.4. Sistema M/M/1 (Distribución de llegadas Poisson/ Tiempo de servicio con distribución exponencial/ Un solo servidor)

Este sistema se puede representar como se muestra en la **figura 2**.



**Figura 2.** Sistema de cola del tipo M/M/1. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la notación de Kendall, el sistema **M/M/1** posee las siguientes características:

- El sistema o distribución de llegada genera un proceso de Poisson (en este tipo de proceso la tasa de ocurrencia de un determinado evento se considera constante en el tiempo. Además, solo pueden ocurrir en un intervalo pequeño de tiempo).
- En este tipo de sistema los tiempos de llegada están distribuidos exponencialmente y tienen una tasa de llegada por unidad de tiempo denominada  $\lambda$ .
- El tiempo de servicio se distribuye de manera exponencial a una tasa de servicio por unidad de tiempo denominada  $\mu$ .
- Posee un único servidor.

**La disciplina asociada a este sistema es la del tipo FIFO** y para el uso de este tipo de sistema se definirá el parámetro factor de utilización o **intensidad de tráfico** ( $\rho$ ) como:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2.5)$$

Bronson (1983) sostiene que en innumerables sistemas de colas se cumple que

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (2.6)$$

Además, las siguientes relaciones se conocen como **fórmulas de Little**

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (2.7)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (2.8)$$

John Conant **Little**, profesor del instituto tecnológico Massachusetts en 1961, desarrolló una teoría de colas importante, y a la vez sencilla, que es aplicada no solo a colas sino también a distintos tipos de sistema. Esta aplicabilidad no está limitada a colas con un solo servidor; Sin embargo, el sistema deberá de estar en un estado estacionario para aplicar dicha formulación.

La fórmula de Little puede ser aplicada a casi cualquier sistema en estado estacionario (sistemas con más de una cola, con una disciplina de línea de espera distinta de FIFO, con un tipo de llegadas que no necesariamente seguirán un proceso de Poisson y con un tiempo de servicio no necesariamente exponencial) Zukerman (2013).

Para un sistema **M/M/1** (llegadas aleatorias/ servicio aleatorio/ un solo servidor) las medidas de eficiencia son:

**Tabla 2.** Medidas de eficiencia del sistema M/M/1

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2.9)$$

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (2.10)$$

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (2.11)$$

$$W_q = \frac{\rho}{\mu - \lambda} \quad (2.12)$$

$$W(t) = e^{-t/W} \quad (2.13)$$

$$W(t)_q = \rho e^{-t/W} \quad (2.14)$$

Se debe tener en cuenta que aunque el tiempo de permanencia en el sistema y el tiempo de servicio poseen una distribución exponencial la diferencia entre estos dos (tiempo de permanencia en la cola) no se distribuye exponencialmente.

Debido a las características de este sistema se puede realizar una analogía entre este y una vía en la cual exista algún tipo de obstrucción (un paradero de transporte público, un estrechamiento de la vía o un semáforo).

Es por ello que es posible emplear la teoría tradicional de colas en los fenómenos de circulación con algún tipo de restricción de capacidad (Fernández, 2011).

#### **2.4. Transformada de Whiting**

De manera general, las colas se producen cuando el flujo ( $q$ ) supera a la capacidad ( $Q$ ). También puede deberse a otras condiciones, como algunas en donde  $q$  supere a  $Q$ , variaciones temporales de  $q$  que conlleven a que  $q \geq Q$  y variaciones temporales de  $Q$  lo que conllevará a que  $q \geq Q$ , en este caso el dispositivo vial variará su capacidad en el tiempo debido a un agente externo que la disminuya.

La manera más adecuada de abordar el fenómeno de formación y disipación de colas vehiculares es enfocando el problema desde el punto de vista de **dos modelos**, uno **estocástico en estado estacionario** y el otro **determinístico** (Gibson, 2001).

##### **2.4.1. Definiciones asociadas**

Terrés (2000) nos proporcionará algunos alcances con respecto a los conceptos antes mencionados.

##### **Modelo:**

Se define como un tipo de esquema teórico matemático cuya función principal es representar una determinada realidad para que de esta manera, y mediante el uso de un número de variables definidas, ayude a entender y predecir el comportamiento de un determinado tipo de sistema cuando este sea sometido a estudio para que, de esta manera, se pueda lograr una mejor comprensión del mismo.

**Modelo determinístico:**

Es aquel que, mediante el uso de modelos matemáticos y sin la aplicación de técnicas de simulación, puede calcular el o los parámetro que se requieren. En este tipo de modelos el uso del mismo parámetro de entrada, bajo las mismas condiciones, producirá los mismos datos de salida, es decir producirá una solución única.

En otras palabras, se asume que el número de eventos que ocurren en la realidad, en torno a un sistema específico, es exacto debido a que los datos disponibles sobre dichos eventos analizados son certeros.

Un ejemplo de un modelo determinístico podría ser el modelo de la capacidad de uno de los accesos a una intersección semaforizada. Dicho modelo estudiará el acceso mediante el uso de parámetros fijos los cuales serán medidos directamente en campo y que podrían variar dependiendo del lugar de estudio pero no variarán al momento de realizar el análisis.

**Modelo estocástico:**

Es aquel en el cual se considera a la incertidumbre como parte de los cálculos dentro del modelo empleado. Esto implica que para simular las probabilidades de distribución, dentro del modelo, se emplee un proceso de aleatorización. Por ejemplo, para simular la probabilidad de que se genere congestión en una intersección en un determinado día y hora se deberá simular la historia de cada vehículo mediante el uso de números aleatorios que pueden representar una probabilidad de ocurrencia entre 1 y 100 % de detención. Esto se repetirá para cada vehículo un número elevado de veces para que al finalizar el análisis se obtenga un valor medio que teóricamente se aproxime al que es utilizado en los cálculos determinísticos.

**Modelo estacionario:**

Este tipo de modelos contemplan que la probabilidad de que ocurra un evento no variará en el transcurso del tiempo.

### **Modelo estocástico estacionario:**

Este tipo de modelos poseen la característica que la probabilidad de que ocurra un determinado resultado depende exclusivamente del estado anterior y no de su historia.

En el proceso de formación y evolución de colas es importante mencionar que, tanto el modelo estocástico estacionario como el modelo determinístico representan un estado distinto dentro del mismo proceso. Es por ello que para representar adecuadamente la formación de colas es necesario usar ambos modelos ya que de esta manera ambos pueden complementarse.

Mientras que el modelo **estocástico en estado estacionario** es viable para un grado de saturación menor que 1 ( $X < 1$ ) con lo cual no es posible mostrar de qué manera evoluciona la cola en periodos de tiempo corto, el **modelo determinístico** considera la variación del flujo vehicular y la capacidad en el tiempo. Sin embargo, debido a que es del tipo determinístico la formación de colas solo surgirán cuando el grado de saturación sea mayor a 1 ( $X \geq 1$ ).

#### **2.4.2. Concepción de la función transformada**

Debido a que cada uno de los modelos presentados anteriormente satisface un requerimiento específico para la modelación de formación de colas ( $X < 1$  ó  $X \geq 1$ ), será necesario considerar un **modelo distinto**. Este deberá tener en cuenta que las colas aumentan con el transcurso del tiempo. Es decir, que el modelo dependerá del tiempo.

El proceso de formación de colas implica que en algún instante de tiempo existirá saturación lo cual, de acuerdo a lo planteado, podría indicar que se formará una cola con longitud infinita; Sin embargo, en la realidad, esto no ocurre debido a que dicha cola solo se presenta en un intervalo definido de tiempo luego del cual el flujo en la intersección disminuirá y de esta manera el acceso se descongestionará.

Debido a que la cola solo se presenta en un intervalo de tiempo, se deberá tener en cuenta la importancia de la duración de dicho intervalo.

Fernández (2011) menciona que, si dentro de un lapso de tiempo  $t$  se puede asumir que  $q$  y  $Q$  son constantes, entonces:

$q = \text{tasa promedio de llegada}$

$Q = \text{tasa promedio de descarga}$

$t = \text{periodo en el cual } q \text{ y } Q \text{ se asumen constantes.}$

$X = q/Q = \text{grado de saturacion del sistema}$

$q_0 = \text{numero de vehiculos dentro de la cola.}$

$q_t = \text{numero de vehiculos dentro de la cola}$

Taylor & Heydecker (2014) afirman que todas las colas estarán definidas por la siguiente ecuación determinística dependiente del tiempo.

$$L(x, t) = L_0 + (\rho - x)\mu t \quad (2.15)$$

Esta ecuación muestra que la longitud de cola en un tiempo  $t$  es igual a la longitud inicial de la cola  $L_0$  más la diferencia entre llegadas y salidas promedio acumuladas donde la tasa de llegadas es expresada en términos de la intensidad del tráfico ( $\rho$ ) relativa a la capacidad ( $\mu$ ), ya que este parámetro es igual a  $S * g/c$  Taylor (2007).

Si  $\rho < 1$ , entonces el valor de la cola promedio tenderá a un valor de equilibrio que está definido por la fórmula de cola promedio propuesta por Pollaczek – Khintchine:

$$L_e = x + \frac{cx^2}{1-x} \quad (2.16)$$

Para que exista equilibrio, la fórmula anterior debe ser finita. Por ello, la primera ecuación deberá permanecer en un estado de equilibrio finito. Esto implica que  $\rho < 1$  y  $x \rightarrow \rho$ . Por ello, dicha condición ocurrirá cuando  $X < 1$ . Donde en la ecuación 2.16 el parámetro “c” de acuerdo con Kimber & Daly (1986)

$$C = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\sigma_a}{\bar{T}_a} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_s}{\bar{T}_s} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

Donde  $\sigma_a$  y  $\bar{T}_a$  son la desviación estándar y la frecuencia media de distribución de llegada respectivamente. Esta proporciona una buena aproximación para rangos de  $\frac{\sigma_a}{\bar{T}_a}$ , por lo general entre 0.75 y 1.25.

Para llegadas y un tiempo de servicio aleatorio,  $(\sigma_a/\bar{T}_a) = (\sigma_s/\bar{T}_s) = 1$ , por ello  $C = 1$ . Para llegadas aleatorias y un tiempo de servicio constante  $(\sigma_a/\bar{T}_a) = 1, (\sigma_s/\bar{T}_s) = 0$ , por lo tanto  $C = 1/2$ .

En el desarrollo de este trabajo se usará el parámetro  $C = 1$ . Esto debido a que cuando esto ocurre se obtiene el resultado estándar de una cola del tipo M/M/1. Por ello la **ecuación 2.16** será expresada de la siguiente manera:

$$L_e = x + \frac{x^2}{1-x} \quad (2.18)$$

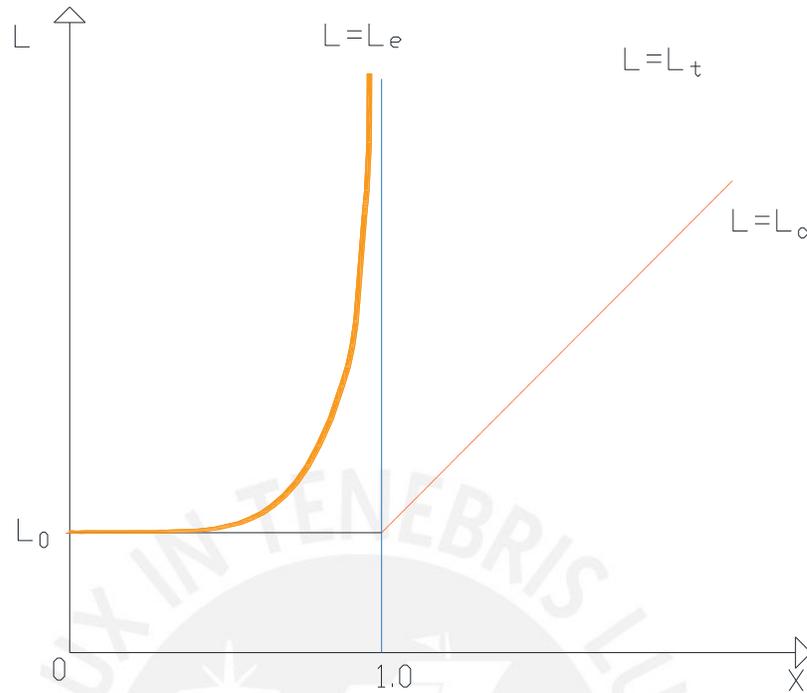
Además, el tiempo que le tomara alcanzar la longitud de equilibrio a la cola será:

$$t_e = x + \frac{1}{Q(1+\sqrt{x})^2} \quad (2.19)$$

En el caso de  $X \geq 1$  la cola crecerá de manera determinística y solamente dependerá del tiempo. Por ello que se afirma que  $L_e < L_d$  tal que:

$$L_d = L_0 + (x-1)Qt \quad (2.20)$$

En la **figura 3** se representará ambos casos y cada uno de ellos se representará con líneas punteadas:



**Figura 3.** Longitudes de colas en función del grado de saturación.

Fuente: Adaptado de (Fernández, 2011)

Como se aprecia en la figura 3 la expresión **estocástica en estado estacionario** ( $L_e$ ), evolución de la cola para los casos de  $X < 1$  (ecuación 2.18), muestra que para un estado en el cual el grado de saturación sea cercano a 1, la longitud de cola será infinita; mientras que la expresión **determinística** ( $L_d$ ), evolución de la cola para los casos de  $X \geq 1$  (ecuación 2.20), indica que para un grado de saturación igual a 1 la longitud de cola será la misma que la longitud de cola inicial.

Ambas conclusiones carecen de sentido en el contexto del análisis y formación de colas vehiculares debido a que, en la realidad, no existen colas de longitud infinita y tampoco una longitud de cola igual a la inicial cuando el grado de saturación es igual a 1.

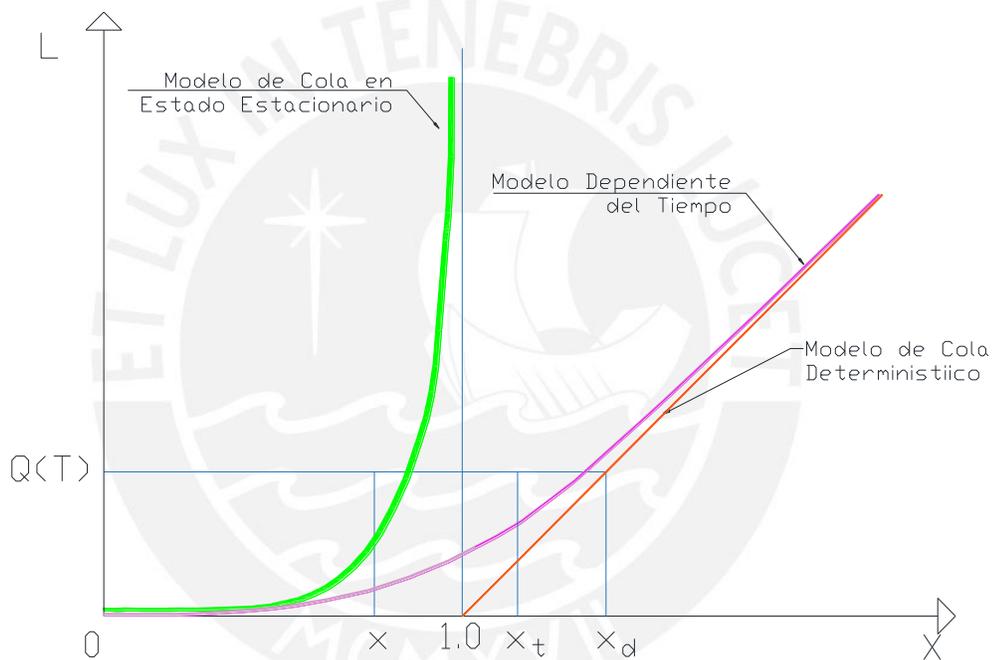
Akcelik (2011) menciona que debido a este problema fue necesario usar una **técnica de transformación de coordenadas** que fue descrita por Kimber y Hollis en el año 1979. Dicha técnica de transformación de coordenadas fue concebida, por Peter D. Whiting que fue pensada para derivar una “expresión de demora aleatoria” para el programa TRANSYT (*Traffic Network Study Tool*).

Esta técnica transforma la función de estado estacionario a una función de transición, la cual tiene como asíntota a la función determinística. Con esta transformación se obtienen

resultados con valores coherentes cuando existe un flujo cercano al valor de la capacidad.

De esta manera, la idea de que la función determinística se convierta en la asíntota de la función estacionaria transformada es una manera coherente de considerar la variación aleatoria del flujo y de la capacidad en el tiempo. (Gibson, 2001).

Mediante el planteamiento de (Rhouphail, et al., 2011) y la **figura 4**, se plantearán las hipótesis para poder hallar la función de transición o transformada de Whiting.



**Figura 4.** Método de transformación de coordenadas.

Fuente: Adaptado de (Rhouphail, et al., 2011).

### 2.4.3. Consideraciones para su planteamiento

Para el desarrollo de esta función se consideraron las siguientes observaciones:

Cuando el grado de saturación es bajo ( $X < 1$ ) las demoras son casi iguales a lo que sucede cuando la intensidad del tráfico es uniforme o constante en el tiempo.

A un alto grado de saturación ( $X > 1$ ) las demoras pueden ser descritas por medio del siguiente modelo determinístico con un grado de aproximación razonable:

$$d = d_1 + \frac{T}{2}(x - 1) \quad (2.21)$$

Donde  $d_1$  es la demora que existe cuando la intensidad del tráfico es baja (demora uniforme) y  $T$  es el periodo de análisis para el que el flujo es sostenido.

Finalmente, la distancia horizontal entre la función propuesta y su asíntota debe ser igual a la distancia entre la función de estado estacionario y a vertical  $X = 1$ .

### 2.4.4. Procedimiento para su modelamiento

El procedimiento para definir la función transformada es el siguiente:

Sea  $X_d$  el grado de saturación para el modelo determinístico (ecuación 2.21),  $X$  es referido a las condiciones en el modelo de estado estacionario (ecuación 2.19), mientras que  $X_t$  hace referencia al modelo que depende del tiempo de tal manera que  $Q(X, T) = Q(X_t, T)$ . Para que las distancias entre cada función y su asíntota correspondiente sean iguales entre sí, de la figura 4 se cumple que:

$$1 - x = x_d - x_T \quad (2.22)$$

Por lo tanto:

$$x = x_T - (x_d - 1) \quad (2.23)$$

De la **ecuación 2.21**

$$x_T = \frac{Q(T) - Q(0)}{CT} + 1 \quad (2.24)$$

La transformación será equivalente a la siguiente configuración:

$$x = x_T - \frac{Q(T) - Q(0)}{CT} \quad (2.25)$$

De la **figura 3**, se infiere que la longitud de cola en el tiempo  $T, Q(T)$  es la misma para  $x, x_T$ , y  $x_d$

$$\frac{Q(T)}{1 + Q(T)} = x_T - \frac{Q(T) - Q(0)}{CT} \quad (2.26)$$

Al eliminar el índice  $T$  en  $x_T$  y resolviendo la ecuación de segundo grado en la ecuación 2.27 para  $Q(T)$  se obtiene:

$$Q(T) = \frac{1}{2}(\sqrt{a^2 + b} - a) \quad (2.27)$$

Donde

$$a = (1 - x)CT + 1 - Q(0) \quad (2.28)$$

$$b = 4(Q(0) + xCT) \quad (2.29)$$

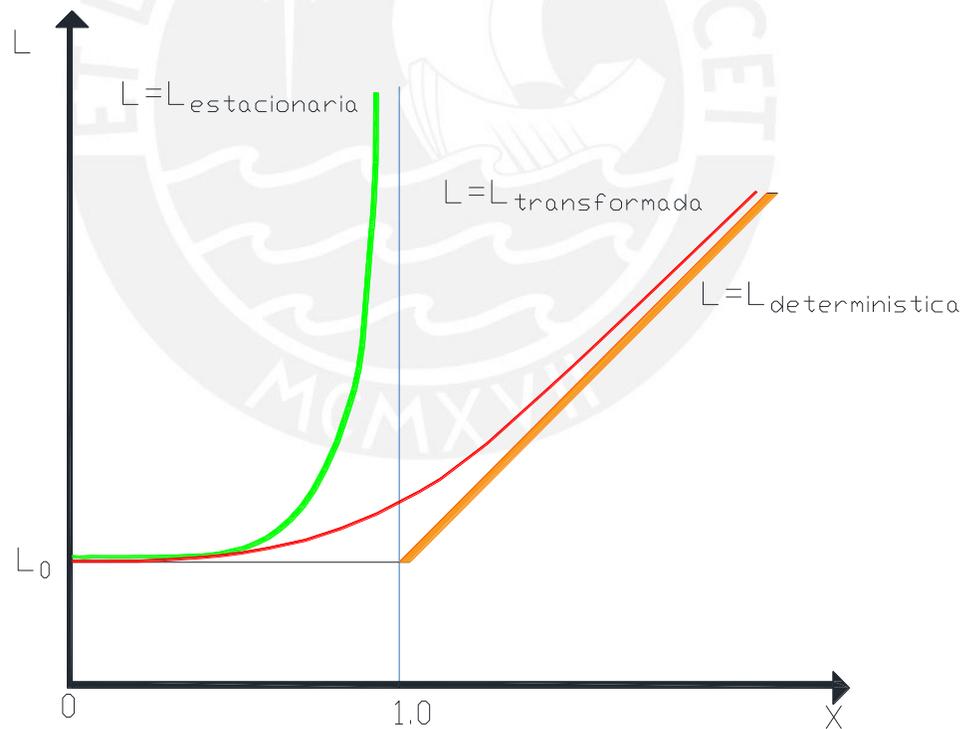
Si se utiliza la ecuación de estado estacionario más general (2.19), el resultado de aplicar las ecuaciones 2.29 y 2.30 y expresando las ecuaciones con los términos definidos en un inicio son los siguientes:

$$L_t = \frac{1}{2} \left( \sqrt{U_L^2 + V_L} - U_L \right) \quad (2.30)$$

$$U_L = a = \frac{(1-x)(Qt)^2 + (1-L_0)Qt - 2(1-C)(L_0 + xQt)}{Qt + (1-C)} \quad (2.31)$$

$$V_L = b = \frac{4(L_0 - xQt)[Qt - (1-C)(L_0 + XQt)]}{Qt + (1-C)} \quad (2.32)$$

Finalmente las tres curvas se presentan en la **figura 5**



**Figura 5.** Modelos de longitud de cola en función del grado de saturación.

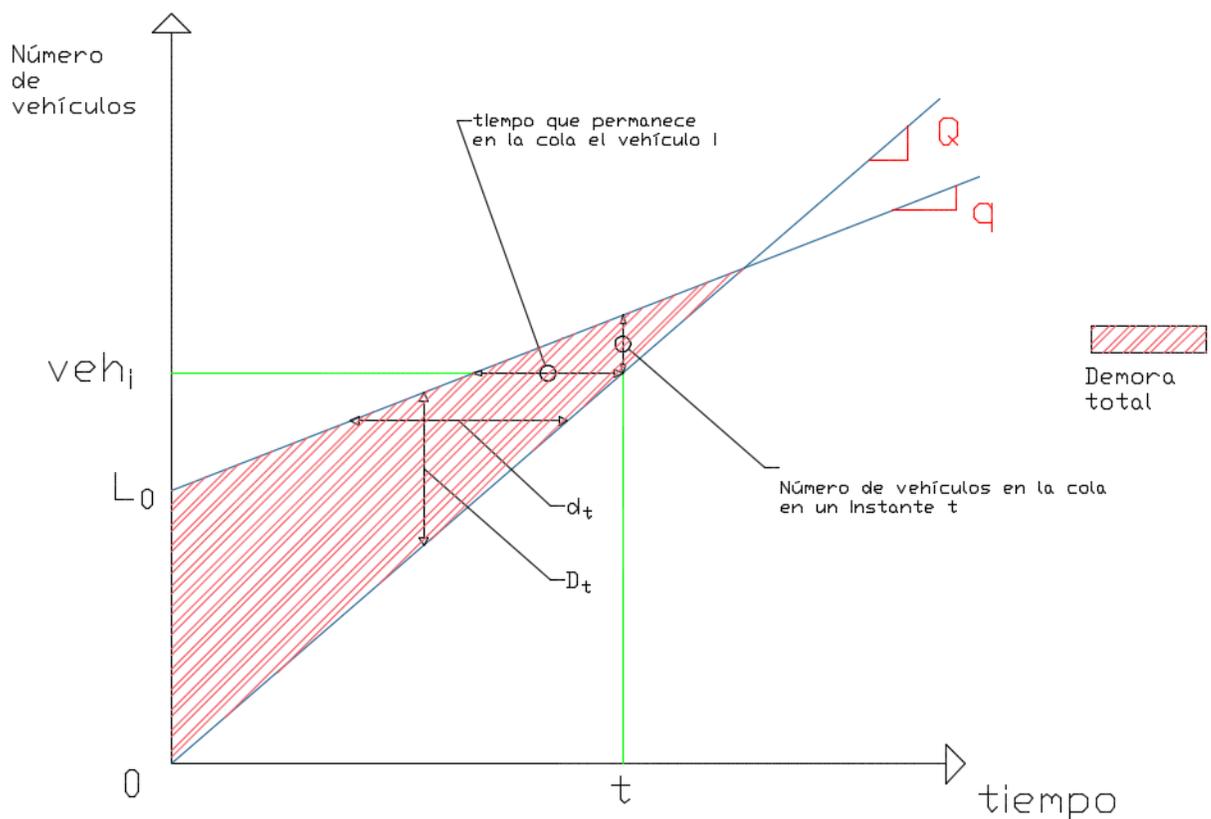
Fuente: Adaptado de (Fernández, 2011).

Fernández (2011) explica que la longitud de cola calculada con la **ecuación 2.31** brinda una buena aproximación para periodos de tiempo no mayores a 15 minutos. Para realizar análisis de periodos más largos, deberá de tomarse periodos de tiempos más cortos y considerando que la longitud de cola inicial del nuevo periodo ( $L_0$ ) sea igual a la longitud de cola calculada en el periodo anterior ( $L_t$ ).

#### 2.4.5. Indicadores del estado de una cola

La función transformada de Whiting, además de calcular la longitud de cola, es una herramienta que ayuda a estimar las demoras promedio que podrían sufrir los vehículos. Es importante mencionar que existe más de una manera del calcular ese valor promedio.

La **figura 6** representa la manera como el número de vehículos en una cola empieza a incrementarse. Nótese que al iniciar el periodo de análisis, existe una cantidad de vehículos en la cola ( $L_0$ ).



**Figura 6.** Indicadores del estado de una cola.  
Fuente: Adaptado de (Fernández, 2011).

La ecuación para la demora promedio por cada vehículo que arriba durante el periodo de análisis puede inferirse a partir de la demora promedio por arribo de vehículo  $d_d$  dentro del periodo  $[0, T]$ .

$$d_d = \frac{[Q(0) + 1] + \frac{1}{2}(x - 1)CT}{C} \quad (2.33)$$

Además, la demora en el estado estacionario  $d_s$  es:

$$d_s = \frac{1}{C} \left( 1 + \frac{Bx}{1-x} \right) \quad (2.34)$$

Finalmente, la ecuación transformada dependiente del tiempo es:

$$d = d_t = \frac{1}{2} \left( \sqrt{U_d^2 + V_d} - U_d \right) \quad (2.35)$$

Y sus parámetros correspondientes son:

$$U_d = \frac{t}{2}(1-x) - \frac{1}{Q}(L_0 - C + 2) \quad (2.36)$$

$$V_d = \frac{2}{Q} \left[ (1-x)t + cxt - 2(1-C) \left( \frac{L_0 + 1}{Q} \right) \right] \quad (2.37)$$

#### 2.4.6. Componente uniforme de la demora

Una intersección semaforizada está sometida a un proceso cíclico de arribos y partidas, lo cual conlleva a que el cálculo de la capacidad, demoras, colas y detenciones se realice de una manera sencilla siempre que no exista sobresaturación.

La componente uniforme de la demora, también conocida como demora uniforme, se produce cuando el flujo  $q$  en un determinado momento es menor que la capacidad  $Q$ . En este escenario, el flujo decrecerá hasta finalizar la fase de verde efectivo o hasta que la cola haya sido totalmente descargada.

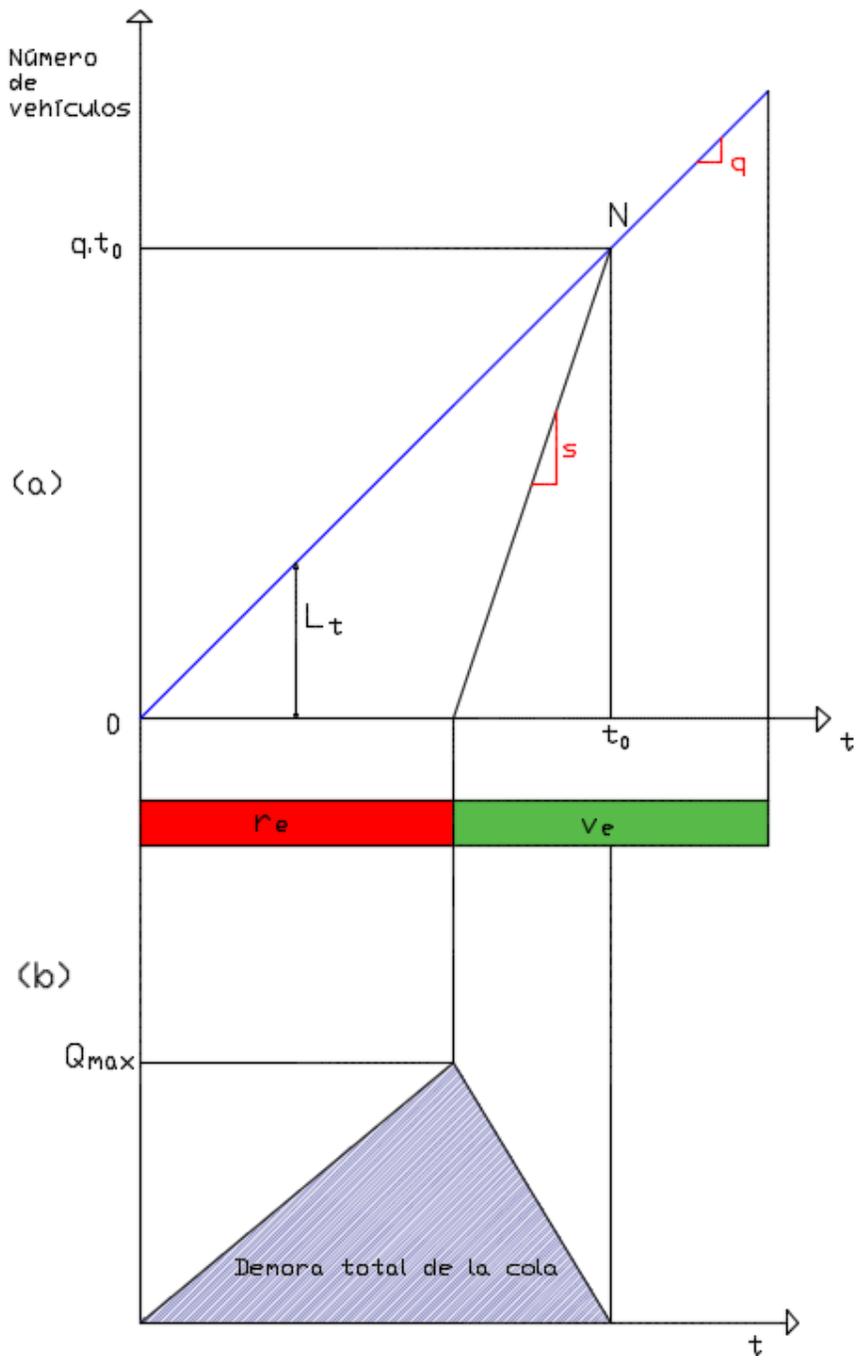
Si además se asume que no existe cola al inicio de un periodo de rojo y también que los valores de  $q$  y  $Q$  no varían o se mantienen constantes durante un ciclo, el valor esperado de la longitud de cola dentro de un ciclo se incrementará linealmente durante la fase de rojo. La situación descrita se muestra en la **figura 7**.

En la figura se muestra el ejemplo de un ciclo no saturado sin una cola inicial al comenzar la fase de rojo. Por ello, se debe tener en cuenta que la figura prevé el valor esperado de la longitud de cola y no la longitud de cola actual. Como se verá, el efecto que los vehículos son entidades discretas desaparecerá si se considera el valor esperado de la longitud de cola.

Mientras que se muestre la señal de rojo los vehículos que lleguen se unirán a la parte trasera de la cola, la cual solo podrá crecer durante esta fase. Cuando el ciclo de verde comience los vehículos empezarán a dejar la parte delantera de la cola hasta que todos los vehículos sean atendidos. La demora de la cola total será calculada simplemente con el cálculo del área del triángulo mostrada.

Si una intersección está sobre saturada, es decir hay más vehículos que llegan de los que salen, un determinado número de vehículos que lleguen al acceso, no serán capaces de cruzar la intersección dentro del mismo ciclo (cola de desbordamiento).

La cola de desbordamiento también se puede observar si a un periodo no saturado le sigue uno saturado y uno donde la cola inicial es distinta de cero



**Figura 7.** Relación entre llegadas, salidas, longitud de cola y retraso total en intersecciones semaforizadas no saturadas con llegadas y salidas uniformes.  
 Fuente: Adaptado de (Viti & Van Zuylen, 2010).

En la **figura 7 (a)** las pendientes de cada una de las rectas representan la tasa de llegada de vehículos ( $q$ ) y la tasa de descarga de la cola ( $S$ ). El ciclo se ha dividido en un periodo de rojo efectivo y otro de verde efectivo. La longitud de cola es representada por  $L_t$  la cual se disipará para un tiempo  $t_0$  dentro del ciclo de análisis. Para ese instante de tiempo, la cantidad de vehículos que han llegado hasta ese momento es  $qt_0$ .

En la **figura 7 (b)** se observa que el área entre la curva de llegadas y descargas, la cual está definida por los parámetros  $qt_0$  y  $r_e$ , representa la demora total en un ciclo  $\Delta_c$ . Dicha demora se estima mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta_c = \frac{1}{2} qt_0 r_e \quad (2.38)$$

Para el cálculo del tiempo  $t_0$ , y de acuerdo con la figura 7 (a), en el punto N deberá cumplirse que la cantidad de vehículos que llega es igual a la cantidad que se descarga. Por ello:

$$qt_0 = S(t_0 - r_e) \quad (2.39)$$

Entonces

$$qt_0 = \frac{r_e S}{S - q} \quad (2.40)$$

Se conoce que,  $r_e = C - V_e$ , también que la razón entre verde efectivo y la duración del ciclo puede representarse por  $u = v_e/C$  y finalmente si se define  $y = q/S$  como el factor de carga se obtiene que:

$$t_0 = \frac{C(1 - u)}{(1 - y)} \quad (2.41)$$

$$\Delta_c = \frac{qC^2(1 - u)^2}{2(1 - y)} \quad (2.42)$$

Con la demora total, la cual será definida más adelante, se podrá conocer las componentes uniformes, la tasa de demora por unidad de tiempo  $DU$  ( $veh - h/h$ ) y la demora promedio por vehículo en un ciclo  $du$  ( $veh - h/veh$ ).

$$DU = \frac{\Delta_c}{C} = \frac{qC(1-u)^2}{2(1-y)} \quad (2.43)$$

$$d_u = \frac{DU}{q} = \frac{C(1-u)^2}{2(1-y)} \quad (2.44)$$

En la **figura 7** se muestra el comportamiento dinámico de las colas cuando se asume tiempos llegada y de servicio constantes. En la realidad, se sabe que los vehículos no llegan o salen a intervalos constantes. Sin embargo, con tasas de arribo bajas es probable que la mayoría de los ciclos empiecen y terminen con una cola sin desbordamiento. Como ocurre en la realidad, en un determinado momento, la intensidad del tráfico se incrementará y la probabilidad de que algunos ciclos comiencen o terminen con una cola vehicular desbordada también se incrementará.

#### **2.4.7. Componente excedente asociado a la demora incremental**

Si lo asumido no se cumple para el caso de una demora uniforme entonces algunos componentes adicionales aparecerán. Dichos componentes reciben el nombre de demoras excedentes o demoras incrementales.

El término demora incremental representa una demora adicional que es experimentada por los vehículos durante un periodo de tiempo específico. Esta demora adicional es el resultado de una sobresaturación temporal debido a naturaleza aleatoria de los arribos vehiculares y a un estado de sobresaturación cuando la tasa de flujo promedio exceda la capacidad. La siguiente formula provee una expresión general para la demora incremental:

Para  $x > x_0$

$$d = 900T \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8K(X - X_0)}{cT}} \right] \quad (2.45)$$

En caso contrario el valor de la demora será cero.

Donde  $T$  es la duración del periodo de flujo en horas,  $X$  es el grado de saturación en el periodo de flujo específico,  $X_0$  es el grado de saturación por debajo del cual la demora es cero ( $X_0 \leq 1$ ),  $K$  es un parámetro de demora y  $c$  es la capacidad de vehículos por hora.

La expresión de la demora en estado estacionario, la cual es la base de la expresión dependiente del tiempo dada por la ecuación 2.45, es:

$$d_s = \frac{K(X - X_0)}{c(1 - X)} \quad (2.46)$$

Esto es para valores de  $X < 1$

Los parámetros  $K$  y  $X_0$ , los cuales determinan la forma de la curva de demora incremental, pueden ser derivados por medio de calibración de las expresiones de estado estacionario usando utilizando los datos para condiciones sin saturación (Para  $x$  hasta aproximadamente 0.95).

El HCM en su ecuación de demora emplea los parámetros de  $K = 0.5$  y  $X_0 = 0$ . En la fórmula alternativa propuesta por Akcelik los parámetros  $K$  y  $X_0$  tendrán los valores de 1 y 0.5 respectivamente. Este modelo será empleado con un valor de  $T = 0.25h$ .

Akcelik & Rouphail (1993) proponen,  $K = 1.5$  y el valor de  $x_0$  es calculado con la siguiente expresión:

$$X_0 = 0.67 + sg/600 \quad (2.47)$$

Además ambos autores, en base a trabajos de simulación, proporcionan una manera alternativa utilizando un valor fijo de  $x_0 = 0.5$  y un parámetro de  $K$  dado por:

$$K = 1.22sg^{-0.22} \quad (2.48)$$

Con la ecuación (2.47) se obtienen valores de  $K$  entre 0.5 y 1.0 para valores de  $Sg$  entre 3 a 60 vehículos por ciclo.

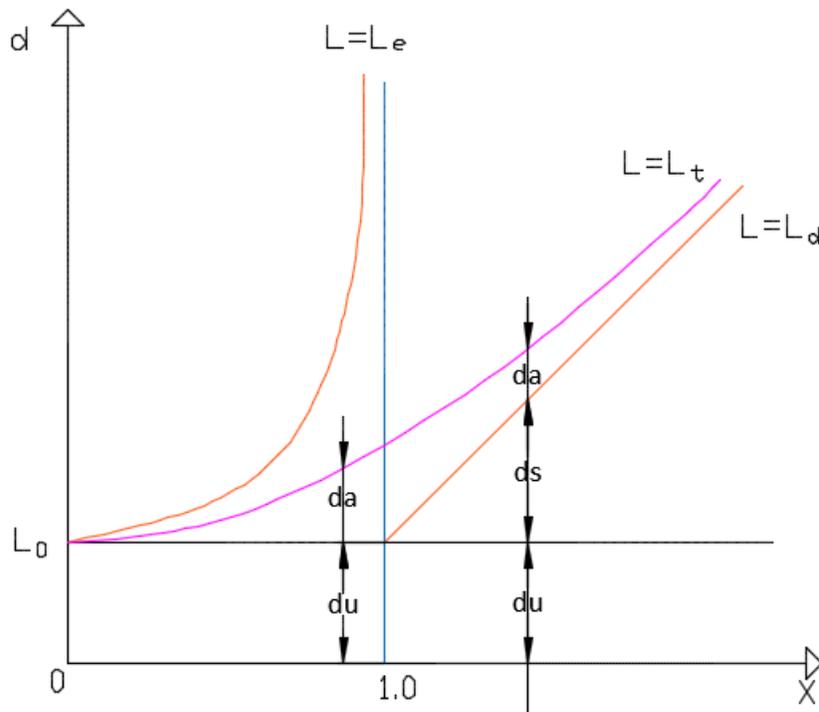
#### 2.4.8. Demora total

La demora total es la suma de las demoras asumiendo condiciones uniformes y además de aquellas que se originan por efectos aleatorios y de sobresaturación. Sean “D” y “d” el valor total de la tasa de demora y la demora promedio por vehículo respectivamente se tiene que:

$$D = DU + DAS = \frac{qC(1-u)^2}{2(1-y)} + N_0x \quad (2.49)$$

$$d = du + das = \frac{qC(1-u)^2}{2(1-y)} + \frac{N_0}{Q} \quad (2.50)$$

Donde **DAS** es la tasa media de demora por aleatoriedad y sobresaturación [ $veh - h/h$ ] y **das** es la demora promedio por vehículo por aleatoriedad y sobresaturación [ $veh - h/veh$ ]



**Figura 8.** Componentes de la demora promedio.

Fuente: Adaptado de (Fernández, 2011)

En la **figura 8** se muestra el total de la demora promedio por vehículo  $d$  en función del grado de saturación  $x$ . Si  $da$  es la demora debido solo a efectos aleatorios y  $ds$  la correspondiente solo por sobrecarga, entonces  $das = da + da$  y  $d = du + das$ .

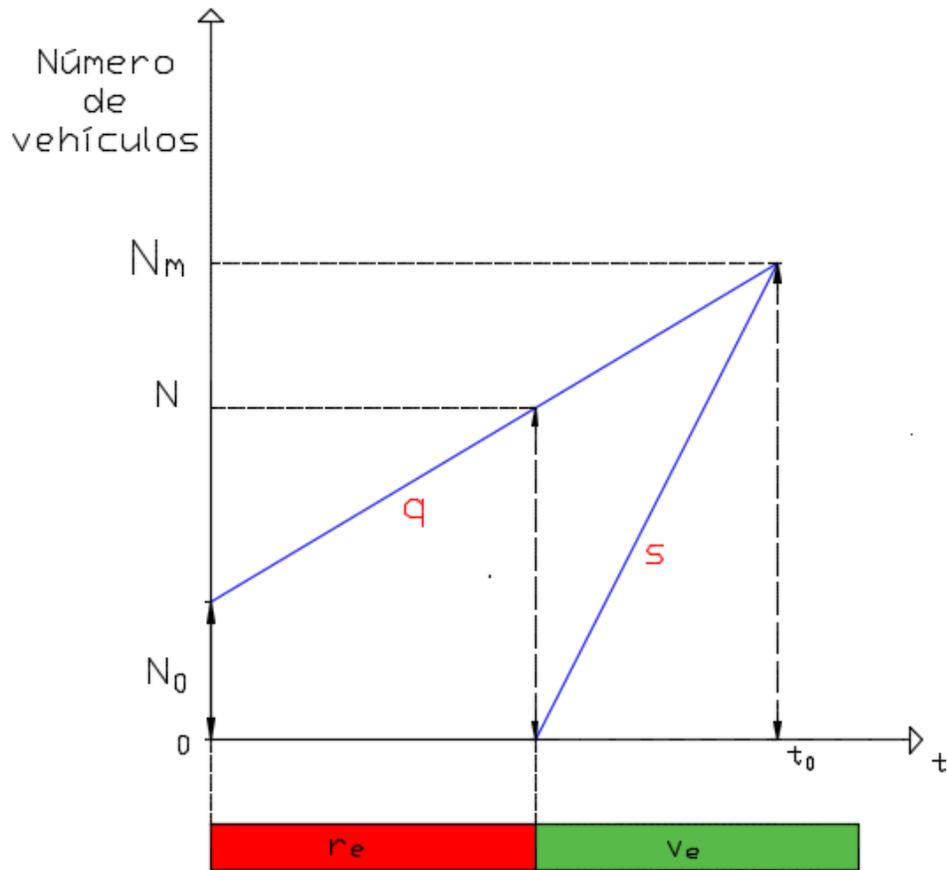
Se observa que para  $x < 1, ds = 0$ . En caso contrario las tres componentes estarán presentes. Cuanto mayor sea  $x$  menor será  $da$  y  $ds$  tendrá mayor importancia en la demora total.

## 2.5. Tipos de colas en una intersección semaforizada

En cada acceso cercano a una intersección semaforizada se formará una cola, la cual dependerá del patrón de llegada de cada uno de los vehículos que la conforman y del número de vehículos que no consiguieron salir del acceso durante el tiempo de verde efectivo.

Es posible determinar la eficiencia de una intersección semaforizada mediante la cuantificación de las colas que se generan.

Existen tres magnitudes de cola que son relevantes y a continuación se procederá a explicarlas utilizando la figura 9 la cual engloba todas estas.



**Figura 9.** Magnitudes existentes de colas en los semáforos.

Fuente: Adaptado de (Fernández, 2011)

En la figura anterior se pueden identificar los distintos tipos de colas que podrían formarse en una intersección semaforizada.

La cola excedente representada por el parámetro ( $N_0$ ); la longitud máxima de la cola ( $N$ ), que representa la longitud de la cola cuando se inicia el tiempo de verde efectivo; y la extensión máxima de la cola ( $N_m$ ) que representa la longitud máxima de vehículos generada por la llegada de estos durante el transcurso del tiempo de verde efectivo uniéndose a la cola aun existente.

De acuerdo a la **figura 9** se observa lo siguiente:

$$N = N_0 + qr_e \quad (2.51)$$

$$N_m = N_0 + qt_0 \quad (2.52)$$

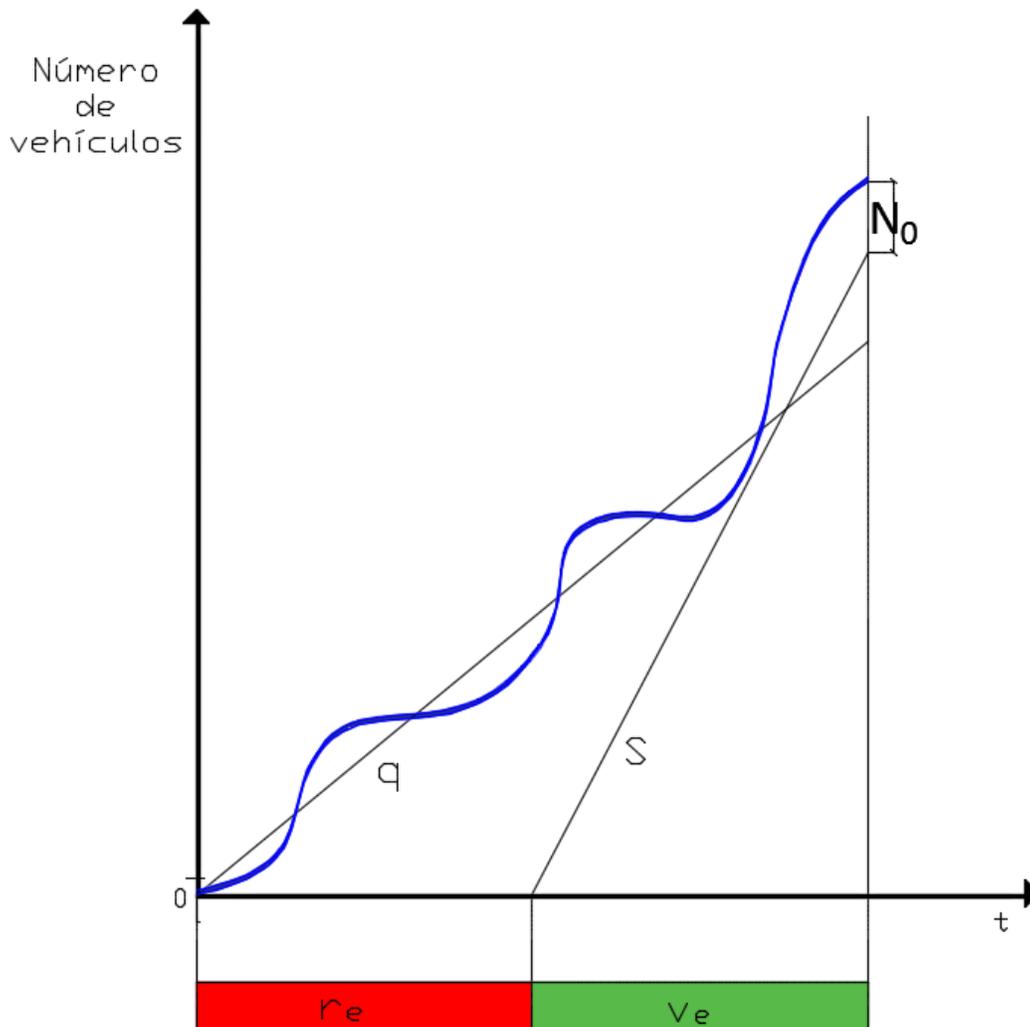
Como  $r_e = C - v_e$  y usando la expresión derivada de  $t_0$  en (2.41)

$$N = qC(1 - u) + N_0 \quad (2.53)$$

$$N_m = \frac{qC(1 - u)}{(1 - \gamma)} + N_0 \quad (2.54)$$

- **Cola excedente**

Tal y como se ha mencionado, este parámetro representa el número de vehículos que permanecen en la cola al finalizar el verde efectivo y su magnitud proviene de fluctuaciones aleatorias propias del flujo vehicular, es por ello que puede emplearse la función transformada para su cálculo. Para esto se asumirá que  $L_0 = 0$  cuando inicie el periodo de rojo efectivo tal como se muestra en la **figura 10**.



**Figura 10.** Magnitudes de la cola excedente.

Fuente: Adaptado de (Fernández, 2011)

La **figura 10** muestra que la demora puede ser mayor o menor a la calculada con la suposición de flujo constante (representado por la línea azul). Además, a pesar de que  $q < Q$ , la cola muchas veces no se disipa durante el tiempo de verde efectivo quedando ( $N_0$ ) vehículos atrapados durante el siguiente periodo rojo.

Akcelik utilizó el método de transformación de coordenadas para obtener una ecuación dependiente del tiempo, la cual es más aplicable al desempeño de intersecciones semaforizadas que las ecuaciones de kimber y hollis.

Finalmente, la función dependiente del tiempo de Akcelik para una longitud de cola excedente y para dos condiciones de grado de saturación será:

Para valores de  $X > X_0$

$$N_0 = \frac{Qt}{4} \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8K(X - X_0)}{Qt}} \right] \quad (2.55)$$

Mientras que para valores de  $X \leq X_0$

$$N_0 = 0$$

Donde  $X_0$  es el grado de saturación a partir del cual los efectos aleatorios son importantes y  $K$  es un parámetro que depende de la aproximación usada.

Fernández (2011) muestra una recopilación de los valores de que son utilizados comúnmente. Esta información se muestra en la **tabla 2**.

**Tabla 2.** Parámetros más usados en el cálculo de cola excedente.  
Fuente: Adaptado de Fernández (2011)

Autor	$X_0$	K	Software
Webster (1966)	0	$X/2$	-
Mc Neil (1968)	0	$1/2$	TRANSYT, HCM
Akcelik (1981)	$0.67 + S.V_e/600$	$3/2$	SIDRA
Rouphail (1991)	0.5	$1.22(S.V_e)^{-0.22}$	-

## Capítulo3. Metodología

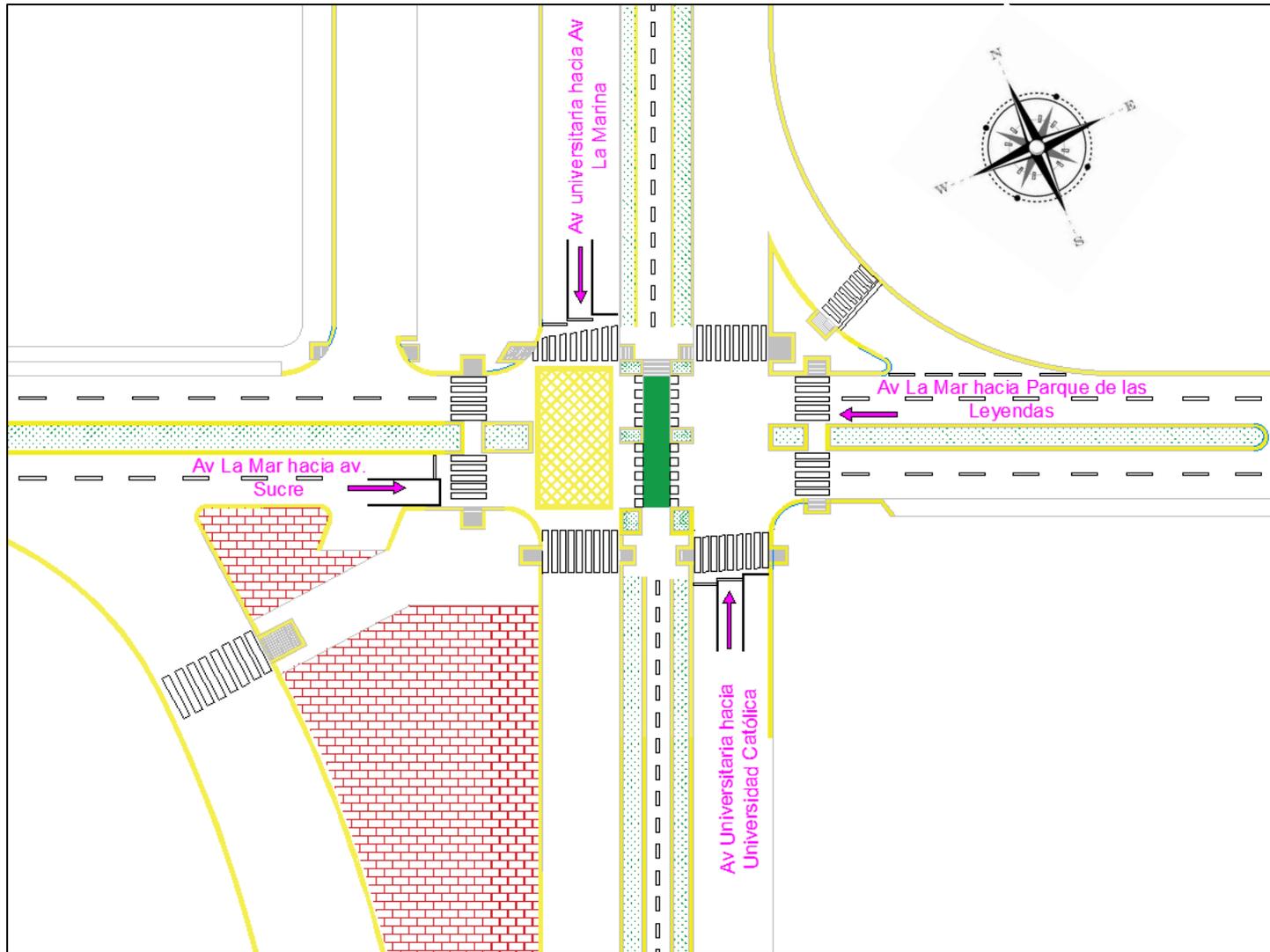
Debido al incremento en el número de vehículos y el impacto negativo de estos sobre las intersecciones semaforizadas, que son parte del espacio público, es que se debe de considerar el estudio de estas y de esta manera evaluar su desempeño. Es así que esta investigación se realizará a través de cuatro etapas: Selección de la intersección a analizar y descripción de la zona de trabajo, obtención de información de flujo en la intersección seleccionada, procesamiento y análisis de los datos recolectados mediante el uso de la expresión de Whiting y finalmente la comparación de resultados obtenidos.

### 3.1 Selección de la intersección a analizar

Como primer paso para el análisis se realizó la elección de la intersección. Esto se realizó bajo la condición de que deberá existir cola excedente. Por esto se realizó una salida de campo y se recorrió las intersecciones cercanas a la universidad para ubicar una intersección con esas características. Después de recorrer distintas intersecciones semaforizadas, se encontró que la intersección ubicada entre las avenidas La Mar y Universitaria, posee una cola excedente la cual se desarrolla dentro del periodo denominado “hora punta” (entre las 5:30 y 8:30 pm). Debido a que la cola excedente se genera por la cantidad de vehículos que provienen del centro comercial plaza San Miguel, esta se formará solo en la avenida la Mar. Por ello, el estudio se llevará a cabo en ambos sentidos de esta avenida.

Luego de escoger la intersección a analizar, se procedió a definir el día y la hora de toma de datos.

A continuación, la **figura 11** muestra un esquema en planta de la intersección a analizar.



**Figura 11.** Esquema de la intersección de las avenidas La Mar y Universitaria.

Fuente: elaboración propia

### 3.2 Descripción de la zona de trabajo

La intersección elegida para el análisis está conformada por cuatro accesos. Dos corresponden a la avenida Universitaria (Sentido Norte – sur) y los otros dos pertenecen a la avenida La Mar (Sentido Oeste – Este).

Debido a que la intersección a analizar está ubicada dentro de una zona comercial existe un flujo peatonal importante por lo cual, además de los semáforos vehiculares, existen semáforos peatonales, ver figura 12.

En la zona central, y a lo largo de la avenida Universitaria, se ubica una ciclo vía de dos sentidos. Esta atraviesa la intersección y a pesar de no presentar un flujo importante de ciclistas es la responsable de generar una zona en la cual se producen conflictos direccionales en la hora punta debido a la existencia de una isla refugio para los ciclistas en el centro de la intersección.



**Figura 12.** Intersección SemafORIZADA Universitaria – la Mar (orientación Sur - Oeste).

Fuente: propia



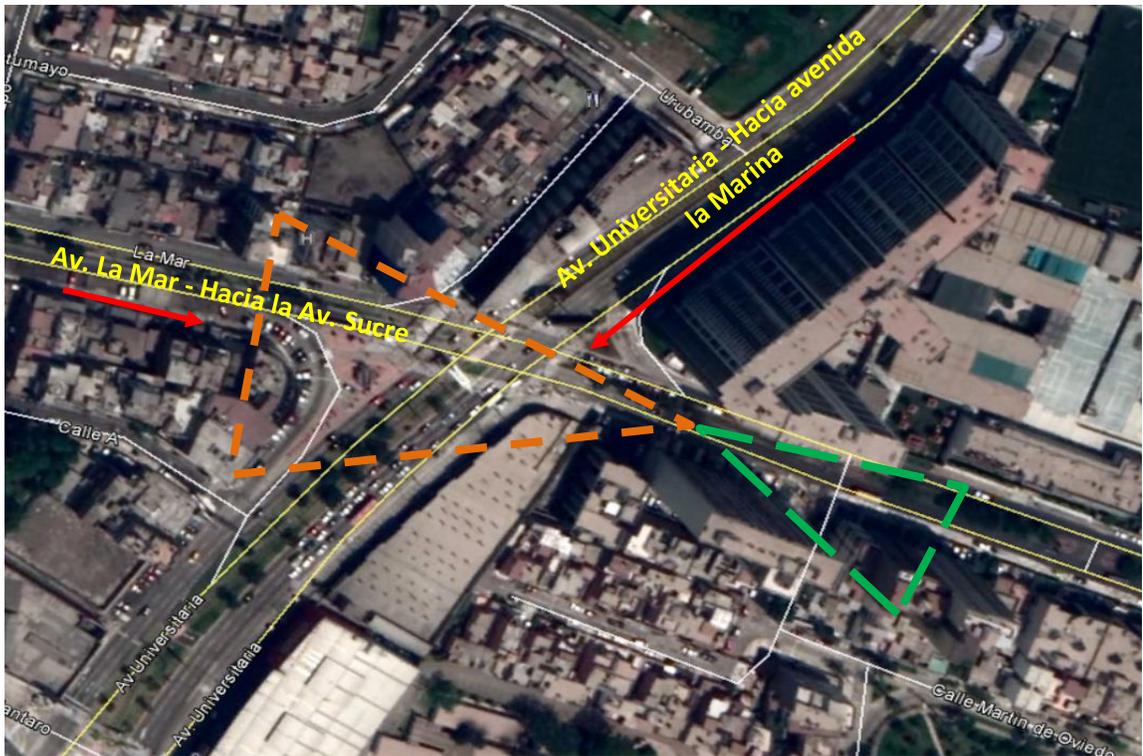
**Figura 13.** Intersección Semaforizada Universitaria – La Mar (Orientación Sur - Este).

Fuente: propia.

### **3.3 Toma de datos**

Los datos fueron recolectados el día sábado 9 de abril de 2016 entre las 17:40 pm y las 19:30 horas. Se eligió este periodo de tiempo para la toma de datos debido a que es dentro de este intervalo que se inicia la denominada hora punta y comienzan a formarse las colas excedentes. Para una recolección adecuada de datos esta se realizó mediante el uso de cámaras de video, esto con el fin de permitir la verificación de los datos requeridos cuantas veces sea necesario, para de esta manera minimizar las posibilidades de un error en la toma de los mismos.

Dicha toma de datos se realizó desde la terraza de un departamento en el piso 19, de la torre C (edificio Imagina) la cual está ubicada en la esquina noreste de la intersección. Para ello se ubicaron, estratégicamente, dos cámaras de video con la finalidad de registrar el comportamiento y evolución de la cola en cada uno de los accesos de la intersección. A continuación la **figura 14** muestra el lugar desde donde se realizó la videograbación así como la ubicación de las dos cámaras utilizadas con su respectivo campo de visión.



**Figura 14.** Ubicación de las Cámaras y su campo de visión

Fuente: Google Earth 2016

Como se aprecia en la figura anterior, ambas cámaras están posicionadas de tal manera que cuentan con un amplio campo de visión solo hacia ambos accesos en la avenida La Mar. Esto se debe a que cuando se realizó la visita a campo se comprobó que solo en esta avenida se produce la cola excedente.

Por ello, una vez ubicadas las cámaras tal y como se muestra en la figura anterior, se dio inicio a la videograbación por medio de la cual se podrá recolectar los datos requeridos para el cálculo de la longitud cola excedente. Entre los datos que se

obtendrán, además de la longitud de cola excedente, están: la demanda y los tiempos de percepción reacción.

Es importante resaltar que mediante el registro de datos por medio del uso de cámaras de video, se podrá registrar el comportamiento e interacción entre los usuarios del dispositivo vial (peatones, vehículos de transporte público y privado).

### **3.4. Tiempos del semáforo**

Además de la toma de datos mediante videograbación, se midieron los tiempos de duración de cada una de las fases de los semáforos que se encuentran en la intersección. Esta medición no se pudo realizar a través de videograbación por dos motivos principalmente: el primero, no se consiguió visualizar todos los cambios de fases de los semáforos ubicados en la intersección, ni el momento exacto en el que cambiaban cada una de estas. Esto debido a que la ubicación de las cámaras priorizaron la filmación del comportamiento de las colas y no los cambios de fases. El segundo motivo es que se podría incurrir en un error de medición por percepción, ya que es posible empezar a contabilizar el inicio o fin de una determinada fase sin que esta haya iniciado o finalizado realmente.

Es debido a lo anterior que tanto las fases como el tiempo de duración del ciclo de cada uno de los semáforos, se realizó *in situ* para, de esta manera, medir el tiempo con el menor error posible.

Una vez realizada la recolección de datos y elaborado el diagrama correspondiente a cada una de las fases, se podrá cuantificar el tiempo de verde y la duración del ciclo del semáforo.

### **3.5. Cálculo de la cola excedente**

La condición principal que debe presentar la intersección a estudiar es que posea altos niveles de congestión vehicular. Por ello, inicialmente se contaba con distintas alternativas. Sin embargo, (la intersección de las avenidas la mar y universitaria se presentó como la mejor alternativa debido a su gran afluencia de vehículos y peatones lo cual se debe a su cercanía al centro comercial Plaza San Miguel.

Una vez definida la zona de estudio, se procederá con la recolección de datos para el cálculo de la cola excedente. Esta recopilación se realizará en intervalos de tiempo (cada

15 minutos) con el fin de obtener resultados comparables a los que se obtendrán en el campo. Debido a que se busca obtener una muestra representativa de lo que sucede en el lugar de análisis, las mediciones se realizarán en un lapso de tiempo total equivalente a la duración de la filmación de video.

Para la medición de la cola excedente debe de tenerse en cuenta que este parámetro se produce cuando el último vehículo de la cola, al final del tiempo de verde efectivo, no logra cruzar la intersección y a partir de este se formará una nueva cola. En este caso, el vehículo podrá atravesar la intersección en el siguiente tiempo de verde efectivo.

Para calcular la longitud de cola excedente de manera teórica, se usará la expresión de Akcelik (ecuación 2.54). Para emplear dicha expresión se deberá tener en cuenta que los parámetros  $X_0$  y  $K$  serán elegidos considerando los valores que provienen de la investigación de Akcelik (indicada en el capítulo 2, tabla 2). Además, el parámetro " $t$ ", el cual corresponde al tiempo utilizado en el análisis que en el caso de esta investigación será de 15 minutos.

### **3.6. Cálculo de la Capacidad**

El cálculo de la capacidad " $Q$ " para la intersección analizar puede ser calculada mediante el uso de la metodología del HCM 2010, mediante el uso del software Synchro o también mediante la toma de datos en campo. De acuerdo a la metodología del HCM, este parámetro puede calcularse empleando la siguiente expresión:

$$Q = S \cdot \frac{\text{tiempo de verde}}{\text{tiempo de ciclo}}$$

El parámetro " $S$ " representa el flujo de saturación y se obtuvo midiendo el tiempo ( $H_1$ ) que le toma cruzar, al primer vehículo de la cola, la línea de parada. Luego se tomará el tiempo  $H_2$  que le tome cruzar al segundo vehículo la línea de parada y así sucesivamente hasta que finalice el tiempo de verde. Esta toma de datos se realizará por cada ciclo de semáforo dentro de intervalo de tiempo en el cual se desarrolle el estudio.

Dentro del cálculo de la capacidad deberá considerarse que este parámetro será calculado utilizando los datos medidos directamente en campo, esto

Con ayuda de los datos recolectados en campo, para cada ciclo, se construirá un gráfico de tiempo en segundos versus número de vehículos. Una vez obtenidos los parámetros requeridos (flujo de saturación promedio, el tiempo de verde y el valor del tiempo de ciclo) se procederá a calcular la capacidad.

### **3.7. Calculo de la demanda y el grado de saturación**

La expresión a emplearse para el cálculo del grado de saturación será:

$$X = \frac{\textit{demanda}}{\textit{capacidad}}$$

De acuerdo a lo explicado en el punto anterior, se obtuvo el parámetro de la capacidad. Por ello, solo resta determinar la demanda lo cual se realizó mediante un conteo vehicular.

Debido a los posibles conflictos direccionales en la intersección a analizar, ocasionados en parte por la presencia de una isla para ciclistas que se encuentra en el medio de la intersección, y al embotellamiento causado por la denominada hora punta no es adecuado medir el parámetro de la demanda desde la línea de parada.

Por ello se eligió un lugar apartado (metros detrás de la línea de parada) desde donde se pudo apreciar el arribo del flujo vehicular al acceso, para de esta manera medir la cantidad real de vehículos que desean cruzar la intersección.

## **Capítulo 4. Recolección de información y procesamiento de datos**

En base a lo descrito en el capítulo de metodología se procedió a realizar la videograbación y posterior colección de datos

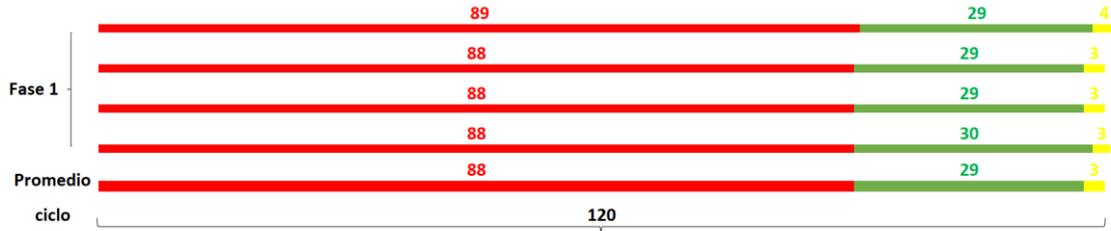
### **4.1. Ciclos y tiempos del semáforo**

El tiempo de las fases de cada uno de los semáforos que están dentro de la intersección a analizar se determinó con la ayuda del cronómetro de un celular. La medición del tiempo se realizó en campo midiendo la duración de cada ciclo, además de la duración de cada una de sus fases. A continuación se presentan los diagramas de tiempos correspondientes a cada uno de los semáforos existentes en el lugar.

El tiempo se registró 4 veces para cada una de las fases (rojo, verde y ámbar) para luego promediar los valores. En el caso de la intersección a analizar esta cuenta con 4 fases de 120 segundos. La fase 1 corresponde a la avenida La Mar (con dirección hacia el parque de las leyendas) con 88 segundos de rojo, 29 de verde y 3 de ámbar; la fase 2 la avenida La Mar (con dirección hacia avenida Sucre) con 87 segundos de rojo, 30 de verde y 3 de ámbar; fase 3 avenida Universitaria (con dirección hacia universidad Católica) con 72 segundos de rojo, 45 verde y 3 ámbar y la fase 4 Avenida Universitaria (con dirección hacia avenida La Marina con los mismos tiempos que el anterior.

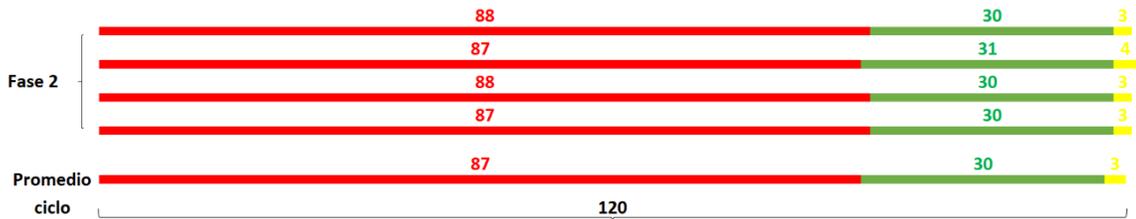
Tanto el tiempo de duración del ciclo como la duración de verde efectivo, serán utilizados para el cálculo de la capacidad y del parámetro  $X_0$  de Akcelik.

A continuación se muestran diagramas de tiempos con cada una de las fases correspondientes a la intersección a analizar.



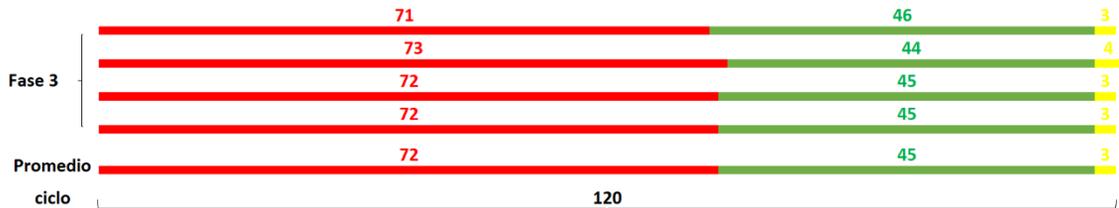
**Figura 15.** Fase 1 del semáforo ubicado en la avenida La Mar con sentido hacia el Parque de las Leyendas.

Fuente: elaboración propia



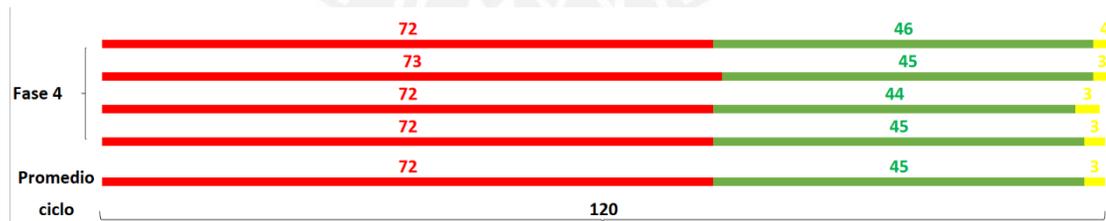
**Figura 16.** Fase 2 del semáforo ubicado en la avenida La Mar con sentido hacia la avenida Sucre.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 17.** Fase 3 del semáforo ubicado en la avenida Universitaria con sentido hacia la Universidad Católica.

Fuente : Elaboración propia.



**Figura 18.** Fase 4 del semáforo ubicado en la avenida Universitaria con sentido hacia la Avenida la Marina.

Fuente: elaboración propia.

Las figuras 15, 16, 17 y 18 muestran cada una de las fases de los semáforos que forman parte de la intersección analizar. Debido a que solo se formarán una longitud de cola cuantificable en la avenida La Mar (ambos sentidos), solo se analizarán la fase 1 y 2.



## 4.2. Flujo de saturación

Este parámetro fue medido directamente de la intersección. Para ello se consideró lo explicado en el capítulo 3; Además se evaluó las consideraciones dadas por la metodología del HCM (TRB, 2010).

De acuerdo a dicha metodología, para el cálculo del flujo de saturación se debe considerar el tiempo que le toma cruzar la línea de parada a un vehículo. Este tiempo se denomina tiempo de percepción reacción y se considera desde el instante en el que el vehículo se haya puesto en marcha después de haber iniciado la fase de verde hasta que este cruza la línea de parada.

El TRB 2010 explica el proceso de descarga de una cola vehicular en una intersección semaforizada de esta manera:

El conductor del primer vehículo de la cola, al observar el cambio de señal a verde, reaccionará a este cambio soltando el freno y acelerando para cruzar la intersección. Dicho intervalo de tiempo se denomina “de percepción reacción” y dentro del cual, para el primer vehículo, este intervalo de tiempo será comparativamente largo como resultado. El segundo vehículo en la cola sufrirá un proceso similar con la diferencia que el tiempo de percepción y reacción puede ocurrir mientras que el primer vehículo está comenzando a moverse. Este vehículo se moverá más rápido que el primero, a medida que se acerque a la línea de parada, porque tendrá una distancia mayor para acelerar. En el caso del tercer y cuarto vehículo, ambos seguirán un proceso similar, cada uno de estos obtendrán un intervalo de tiempo ligeramente menor que el vehículo anterior. Después del cuarto vehículo, el efecto del tiempo por percepción reacción habrá desaparecido debido a que uno a uno los vehículos cruzarán la línea de parada a una velocidad constante hasta que el último vehículo de la cola haya cruzado o el tiempo de verde haya terminado. En este punto el tiempo de percepción reacción será relativamente constante.

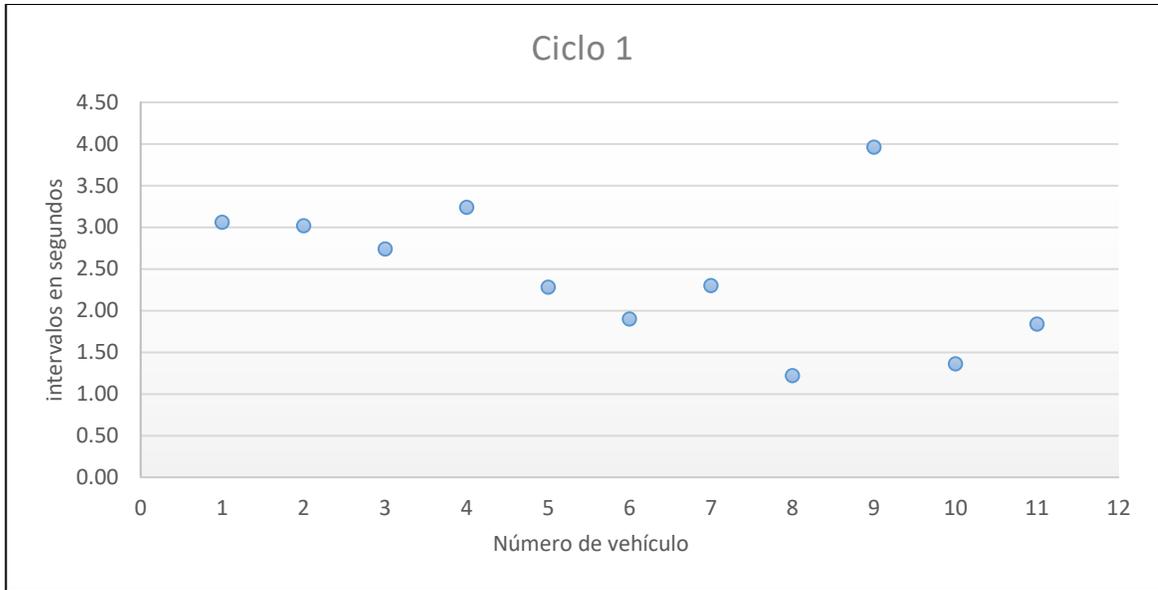
Al iniciarse el proceso de descarga de una intersección, los vehículos experimentan un alejamiento entre ellos debido a que el que se encuentra inmediatamente delante acelera primero y por ende su velocidad será mayor al que le sigue. Sin embargo, conforme los vehículos crucen la intersección el tiempo que les tomará realizar esta acción ira disminuyendo. Finalmente este comportamiento se estabilizará cuando el vehículo

delantero haya alcanzado su velocidad de marcha normal y por ende dejará de acelerar. Es de esta manera que, si no existe una acción de adelantar por parte del vehículo que está detrás, los vehículos proseguirán su marcha con aproximadamente la misma velocidad y el tiempo de percepción y reacción se vuelve aproximadamente constante.

Debido a que este proceso se repite de forma cíclica para cada uno de los vehículos que conforman la cola y además se busca obtener un tiempo representativo, como tiempo de percepción reacción, el TRB, 2010 considera que este periodo de tiempo deberá ser considerado específicamente a partir del quinto vehículo en la cola. Esto se debe principalmente a que los primeros vehículos en cruzar la intersección presentarán tiempos elevados debido a distintos factores a tener en cuenta como: el frenar de manera sorpresiva ante el cruce intempestivo de algún transeúnte, lo cual provoca un retraso en el tiempo que le tomaría dejar la intersección, el tiempo que le toma en reaccionar al cambio a verde, lo cual varía de conductor en conductor, y considerar que durante el tiempo previo al cambio de señal existe una posibilidad de que el conductor esté realizando una actividad que distraiga su atención y retrase así su reacción al cambio de señal.

Debido a que los primeros vehículos dentro de una cola podrían estar expuestos a alguna de las circunstancias descritas anteriormente, no se puede considerar como representativo el tiempo que les tomará dejar el acceso.

A continuación se muestra uno de los gráficos obtenidos en uno de los ciclos medidos y en el que se muestra los tiempos de cruce de los vehículos a partir del primero que cruza la línea de parada.



**Figura 19.** Gráfica de intervalos de tiempo versus número de vehículos. Acceso La Mar hacia el parque de las Leyendas. Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la figura 19, los tiempos de cruce para cada uno de los vehículos dentro del ciclo 1 varían entre uno y otro vehículo. A continuación la Tabla 2 mostrará el tiempo, medido en segundos, que le corresponde a cada uno de los vehículos analizados.

**Tabla 2.** Tiempo que le toma a cada vehículo cruzar la línea de parada. Acceso: La Mar hacia el Parque Fuente: elaboración propia.

vehículo	ciclo 1 (s)
1	3.06
2	3.02
3	2.74
4	3.24
5	2.28
6	1.90
7	2.30
8	1.22
9	3.96
10	1.36
11	1.84

Los tiempos recolectados en campo se promediarán para así obtener el tiempo promedio estable que le tomará a cada vehículo cruzar la línea de parada.

Con este valor de tiempo promedio se calculará el número de vehículos que cruzarán la línea de parada en una hora, esto representa el parámetro denominado flujo de saturación el cual estará expresado en  $\frac{veh}{hora}$ . El flujo de saturación representa el volumen máximo de tránsito vehicular que puede darse dentro una intersección semaforizada a través de un acceso.

Este parámetro fue calculado cada 15 minutos lo cual implica que los ciclos siguientes deberán de agruparse en intervalos de 15 minutos. Es decir, los primeros quince minutos, los siguientes quince y así sucesivamente hasta completar una hora.

Cada conjunto de datos, los cuales han sido agrupados en intervalos de tiempo de 15 minutos, será promediado para de esta manera calcular un flujo de saturación promedio cada quince minutos y cuyo resultado será llevado a una hora por medio de una regla de tres simple.

De esta manera, se podrá calcular un valor de flujo de saturación, por cada intervalo de quince minutos, y por medio de los valores colectados de tiempo de verde y ciclo del semáforo en campo, se podrá calcular la capacidad.

A partir de los tiempos de cruce de la línea de parada tomados en campo por ciclo y agrupados cada 15 minutos se calculó el valor del flujo de saturación para cada uno de los accesos. Para el cálculo se consideró lo estipulado por TRB, 2010 que define este parámetro como el número de vehículos por hora y por carril que pueden cruzar una intersección semaforizada si la señal de verde fuese continua por una hora.

El tiempo promedio medido por cada ciclo, expresado en segundos, y agrupado en columnas para cada uno de los accesos en intervalos de 15 minutos son mostrados en las tablas 3 y 3.1.

Para cada uno de los valores de tiempo medidos en campo primero se calculará el parámetro denominado flujo de saturación. Este valor se calculará mediante la interpolación entre el tiempo promedio que le tomará dejar a un vehículo la intersección con el número de vehículos que abandonaran el acceso en 1 hora.

Con los valores de flujo de saturación calculados, se hallará el valor promedio de este parámetro promediando cada uno de los flujos por cada ciclo que pertenezca a un intervalo de tiempo de 15 minutos.

Finalmente este valor promedio será el que represente al flujo de saturación dentro de cada uno de los intervalos de tiempo de estudio.

Cabe resaltar que el número de mediciones para el tiempo promedio varía conforme el estudio se desarrolla. En este caso, en los primeros 15 minutos ambos accesos poseen igual número de datos situación que no se repite para los siguientes 30 minutos; dentro de este intervalo de tiempo el acceso de La Mar hacia la avenida sucre posee un ciclo más. Entre los 30 y 45 minutos siguientes el acceso de La Mar hacia el parque de las leyendas posee un ciclo más y por ende un valor de flujo de saturación adicional. Finalmente, los datos obtenidos en los últimos 15 minutos muestran que existen dos ciclos más en el acceso de La Mar hacia la avenida Sucre.

**Tabla 3.** Flujo de saturación para los primeros quince minutos para cada acceso.  
Fuente: Elaboración propia

Acceso	La Mar hacia parque de las leyendas		La Mar hacia avenida Sucre	
	Intervalos (s)	S (veh/h)	Intervalos (s)	S (veh/h)
15	2.45	1469	2.71	1327
	3.16	1139	2.70	1335
	2.20	1636	2.83	1274
	2.81	1281	2.57	1399
	2.82	1277	2.45	1471
	2.36	1525	2.79	1292
	2.63	1369	3.76	958
	2.58	1395	2.51	1432
	<b>Promedio</b>	<b>1386</b>	<b>Promedio</b>	<b>1311</b>
30	2.82	1275	2.69	1339
	2.81	1281	2.90	1243
	2.93	1228	2.88	1250
	2.52	1429	2.40	1502
	2.62	1374	2.62	1372
	2.49	1448	2.81	1279
	2.70	1333	2.75	1310
	-	-	2.71	1328
	<b>Promedio</b>	<b>1338</b>	<b>Promedio</b>	<b>1328</b>

**Tabla 3.1.** Flujo de saturación cada quince minutos para cada acceso.

Fuente: Elaboración propia

Acceso	Av. La Mar hacia parque de las leyendas		Av. La Mar hacia avenida Sucre	
	Intervalo (s)	S (veh/h)	Intervalo (s)	S (veh/h)
45	2.71	1328	2.38	1510
	2.21	1629	2.52	1431
	2.68	1342	2.78	1294
	2.63	1368	2.86	1261
	2.51	1432	2.61	1381
	2.61	1380	2.89	1245
	2.35	1532	-	-
	<b>Promedio</b>	<b>1430</b>	<b>Promedio</b>	<b>1354</b>
60	2.49	1446	2.56	1408
	2.51	1436	2.45	1468
	2.61	1379	2.62	1373
	2.56	1406	2.63	1370
	2.48	1452	2.59	1390
	2.45	1469	2.79	1288
	2.40	1500	2.61	1377
	-	-	2.96	1216
	-	-	3.00	1202
	<b>Promedio</b>	<b>1441</b>	<b>Promedio</b>	<b>1344</b>

Para cada uno de los valores de tiempo medidos en campo, se calculará el parámetro denominado flujo de saturación. Este valor se hallará mediante la interpolación entre el tiempo promedio que le tomará dejar a un vehículo la intersección con el número de vehículos que abandonaran el acceso en 1 hora.

Con los valores de flujo de saturación calculados, se hallará el valor promedio de este parámetro promediando cada uno de los flujos por cada ciclo que pertenezca a un intervalo de tiempo de 15 minutos.

Finalmente este valor promedio será el que represente al flujo de saturación dentro de cada uno de los intervalos de tiempo de estudio.

Cabe resaltar que el número de mediciones para el tiempo promedio varía conforme el estudio se desarrolla. En este caso, en los primeros 15 minutos ambos accesos poseen igual número de datos situación que no se repite para los siguientes 30 minutos; dentro de este intervalo de tiempo el acceso de La Mar hacia la avenida sucre posee un ciclo más. Entre los 30 y 45 minutos siguientes el acceso de La Mar hacia el parque de las leyendas posee un ciclo más y por ende un valor de flujo de saturación adicional. Finalmente, los datos obtenidos en los últimos 15 minutos muestran que existen dos ciclos más en el acceso de La Mar hacia la avenida Sucre.

### 4.3. Demanda

Los datos recolectados para la demanda fueron medidos en intervalos de 15 minutos considerando como tiempo total de toma de datos una hora. La tabla 4 muestra el parámetro de la demanda obtenido cada 15 minutos y por acceso.

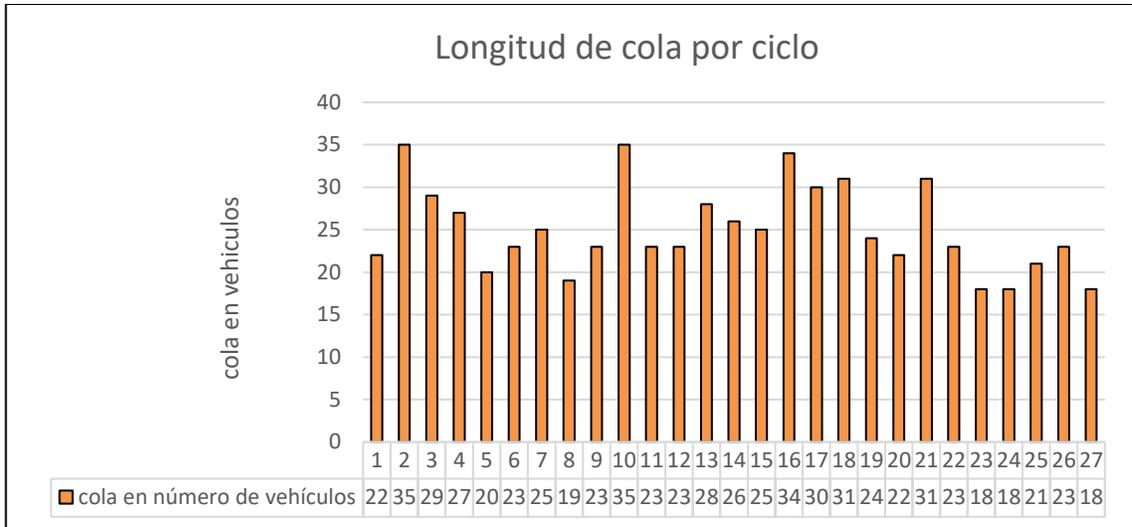
**Tabla 4.** Demanda cada 15 minutos por acceso.  
Fuente: Elaboración propia

Hora	Demanda (veh/15 min)	
	Av. La Mar (Hacia el parque de las leyendas)	Av. La Mar (hacia avenida Sucre)
19:00 – 19:15	180	198
19:15 – 19:30	188	173
19:30 – 19:45	196	178
19:45 – 20:00	205	220

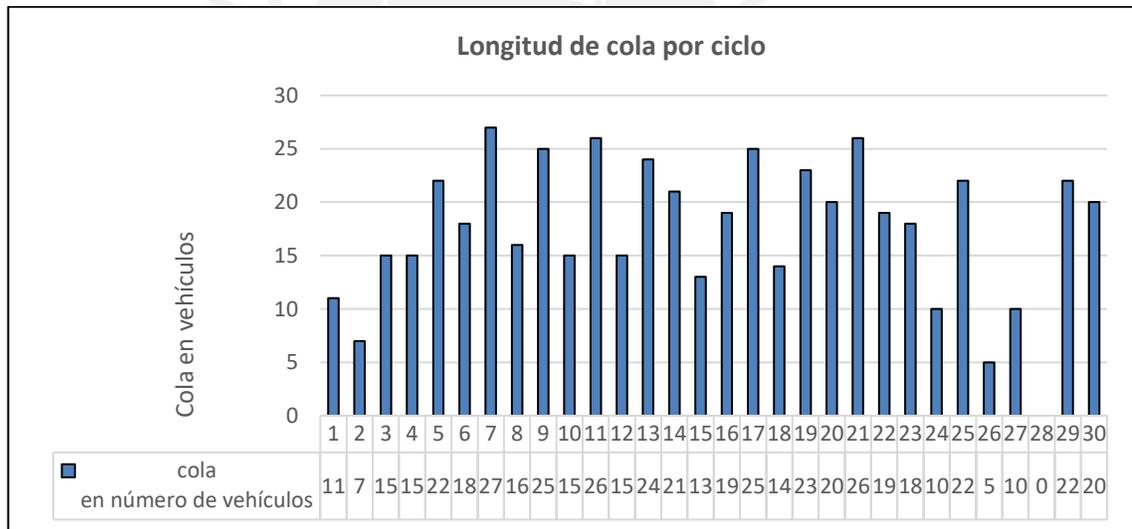
La segunda y tercera columna de la tabla 4 muestra la demanda medida directamente en el campo por cada acceso en un periodo de 15 minutos. Dicha demanda será llevada a una hora por medio de una regla de tres simples y se mostrará en el capítulo de procesamiento de datos.

### 4.4. Cola excedente

La cola excedente fue contabilizada por ciclo en cada uno de los ramales correspondientes a la avenida La Mar. A continuación se presentan los resultados obtenidos de campo en cada uno de los accesos y por cada ciclo:



**Figura 20.** Cola excedente. Rumbo: La mar hacia parque de las leyendas.  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 21.** Cola excedente. Rumbo: La mar hacia avenida Sucre.  
Fuente: Elaboración propia

Ambas figuras muestran la longitud de cola medida en número de vehículos, y su evolución a lo largo de cada uno de los ciclos medidos. Al comparar ambas figuras se puede apreciar que el acceso con dirección hacia el parque de las leyendas (Figura 20) en los ciclos desde el primero al cuarto, además del décimo, décimo quinto, décimo sexto, décimo octavo, vigésimo primero, vigésimo sexto y vigésimo séptimo existe una marcada diferencia a nivel de longitud de cola, mientras que en los demás ciclos existe una cierta paridad entre ambos accesos. Cada una de estas diferencias será expuesta de manera más detallada en el capítulo análisis de resultados y conclusiones.

## Capítulo 5. Análisis de resultados

### 5.1. Demanda, capacidad y grado de saturación

A partir de la demanda medida directamente en el campo, dentro de un periodo de tiempo de quince minutos, se calculará la demanda de vehículos por hora para cada uno de los accesos.

La capacidad se calculó mediante la expresión:  $Q = 2 \left( \frac{V_e}{C} \right) S$  y se multiplicó por 2 debido a que existen dos carriles por acceso. Mientras que el grado de saturación, el cual es la razón entre la demanda vehicular y la oferta vial (capacidad), fue calculado a partir de los datos anteriores.

Las **tablas 5** y **6** muestran la demanda por hora, la capacidad y el grado de saturación por Acceso

**Tabla 5.** Demanda, capacidad y grado de saturación. Acceso La Mar hacia parque de las leyendas.

Fuente: Elaboración propia

Hora	Demanda veh/h	capacidad (veh/h)	X
19:00 – 19:15	720	670	1.07
19:15 – 19:30	752	647	1.16
19:30 – 19:45	784	691	1.13
19:45 – 20:00	820	696	1.18

**Tabla 6.** Demanda, capacidad y grado de saturación. Acceso La Mar hacia avenida Sucre.

Fuente: Elaboración propia

Hora	Demanda (veh/h)	Capacidad (veh/h)	X
19:00 – 19:15	792	634	1.25
19:15 – 19:30	692	642	1.08
19:30 – 19:45	712	654	1.09
19:45 – 20:00	880	649	1.36

Se puede apreciar una demanda creciente conforme avanza el intervalo de tiempo de análisis. Esto se ve reflejado en los resultados correspondientes a la capacidad y de igual manera en el grado de saturación.

## 5.2. Parámetros para el cálculo de la cola excedente

En base a la formulación de Akcelik (ecuación 2.54) se calculará la longitud de cola excedente.

Para ello se comentará sobre los parámetros que envuelven a dicha expresión y los valores obtenidos en cada uno de sus términos.

### 5.2.1 Parámetros $X_0$ y $Q_t$

El valor límite  $x_0$  de acuerdo Akcelik puede ser calculado mediante la expresión:

$$X_0 = 0.67 + S \frac{V_e}{600}$$

Mientras que el máximo número de vehículos que puede ser descargado durante un periodo de tiempo específico (parámetro “ $Q_t$ ”), deberá ser calculado para cada uno de los intervalos de 15 minutos.

Las tablas 7, 8, 9 y 10 que se mostrarán a continuación muestran los parámetros descritos anteriormente y además la longitud de cola excedente.

**Tabla 7.** Información obtenida para el cálculo de la cola excedente. Acceso La Mar avenida Sucre.

Fuente: Elaboración propia

Tiempo (Minutos)	$Q_t/4$	$x - 1$	$(x - 1)^2$	$X_0$	$\frac{8K(x - x_0)}{Q_t}$
15:00	39.63	0.25	0.063	0.688	0.04257
30:00	40.13	0.08	0.006	0.688	0.02932
45:00	40.88	0.09	0.008	0.688	0.02949
60:00	40.56	0.36	0.130	0.688	0.04970

**Tabla 8.** Cálculo de cola excedente. Acceso La Mar hacia avenida Sucre

Fuente: Elaboración propia

Tiempo (Minutos)	$\frac{(X-1)^2}{Qt} + \frac{8K(X-X_0)}{Qt}$	$\sqrt{(X-1)^2 + \frac{8K(X-X_0)}{Qt}}$
15:00	0.105	0.320
30:00	0.036	0.190
45:00	0.038	0.190
60:00	0.179	0.420

**Tabla 9.** Cálculo de cola excedente. Acceso La Mar hacia avenida Sucre

Fuente: Elaboración propia

Tiempo (Minutos)	$(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8K(X-X_0)}{Qt}}$	$N_0$
15:00	0.570	23
30:00	0.270	11
45:00	0.280	11
60:00	0.780	32

**Tabla 10.** Información obtenida para el Cálculo de la cola excedente. Acceso la Mar hacia Parque de las Leyendas Fuente: Elaboración propia

Tiempo (Minutos)	$Qt/4$	$x-1$	$(x-1)^2$	$X_0$	$\frac{8K(x-x_0)}{Qt}$
15:00	41.88	0.07	0.0056	0.689	0.02800
30:00	40.44	0.16	0.0256	0.688	0.035
45:00	43.19	0.13	0.0169	0.689	0.031
60:00	43.50	0.18	0.0324	0.689	0.034

**Tabla 11.** Cálculo de la cola excedente. Acceso La Mar hacia parque de las leyendas.

Fuente: Elaboración propia

Tiempo (Minutos)	$\frac{(X-1)^2}{Qt} + \frac{8K(X-X_0)}{Qt}$	$\sqrt{(X-1)^2 + \frac{8K(X-X_0)}{Qt}}$
15:00	0.034	0.183
30:00	0.061	0.246
45:00	0.048	0.219
60:00	0.066	0.258

**Tabla 12.** Cálculo de la cola excedente. Acceso La Mar hacia parque de las leyendas.

Fuente: Elaboración propia

Tiempo (Minutos)	$(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8K(X - X_0)}{Qt}}$	$N_0$
15:00	0.258	11
30:00	0.406	16
45:00	0.349	15
60:00	0.438	19

Las tablas 7, 8 y 9 muestran el cálculo parcial de los parámetros principales, correspondientes al empleo de la fórmula derivada de la transformada de Whiting. Mientras que las tablas 10, 11 y 12 muestran los resultados parciales producto de operar los parámetros obtenidos, de manera secuenciada.

### 5.3. Parámetros para el cálculo de la cola excedente

El tiempo promedio que le tomó a cada vehículo cruzar la línea de parada dentro de un ciclo, tiempo de percepción reacción, varió mucho de un ciclo a otro incluso dentro de un mismo acceso. A continuación se muestran las gráficas de tiempo de cruce por vehículo agrupados en intervalos de tiempo de 15 minutos.

Tiempo de Cruce por Vehículo - 15 Primeros Minutos.

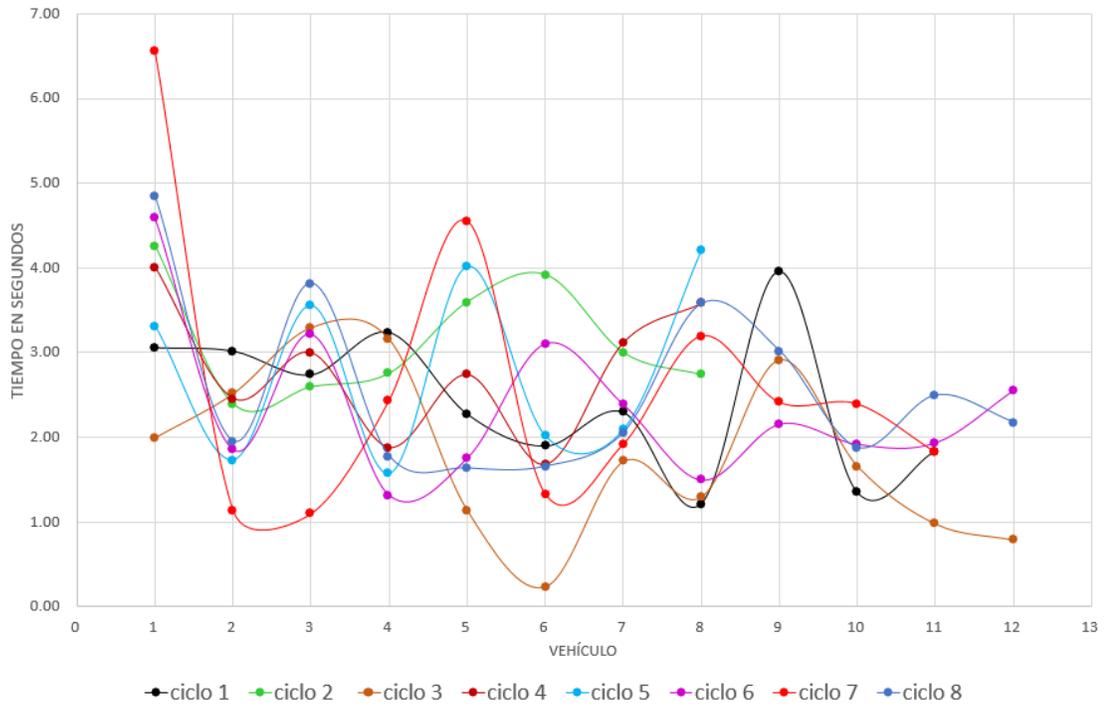


Figura 22. Acceso La Mar – Parque de las Leyendas 15 primeros minutos  
Fuente: elaboración propia

Tiempo de Cruce por Vehículo entre 15 y 30 Minutos

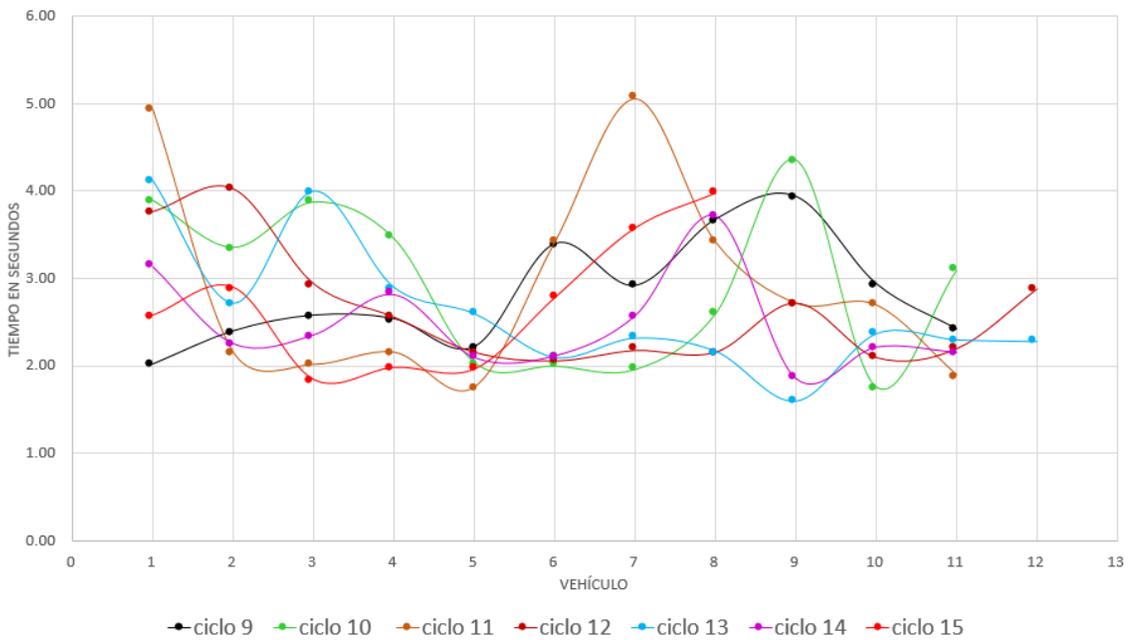
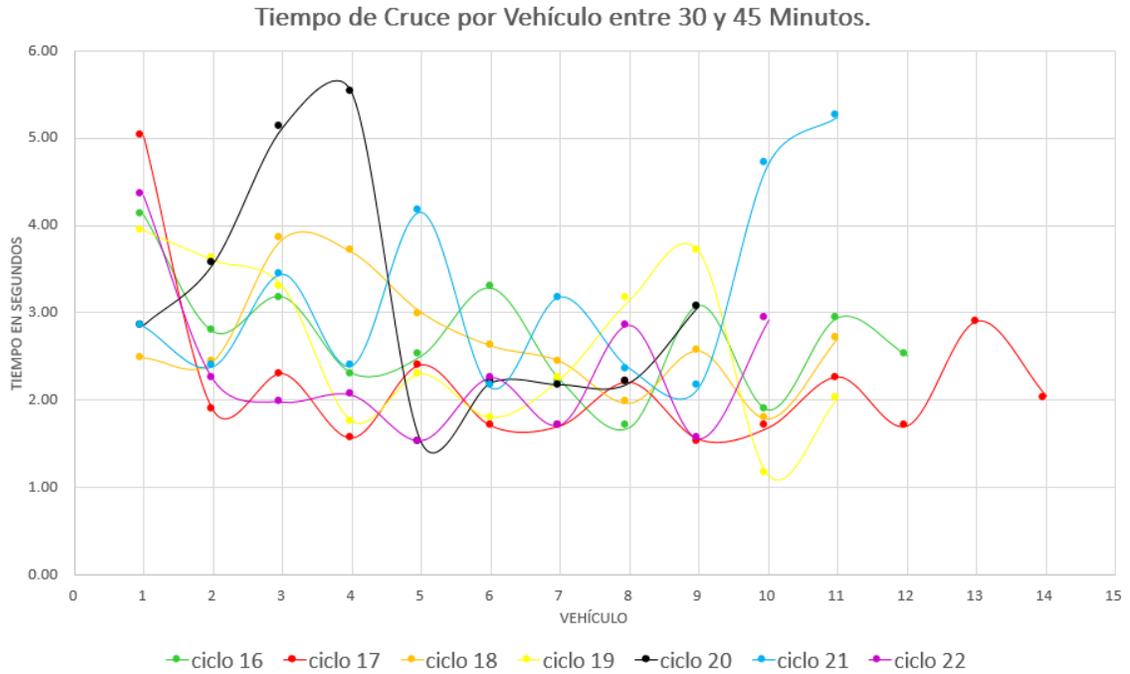
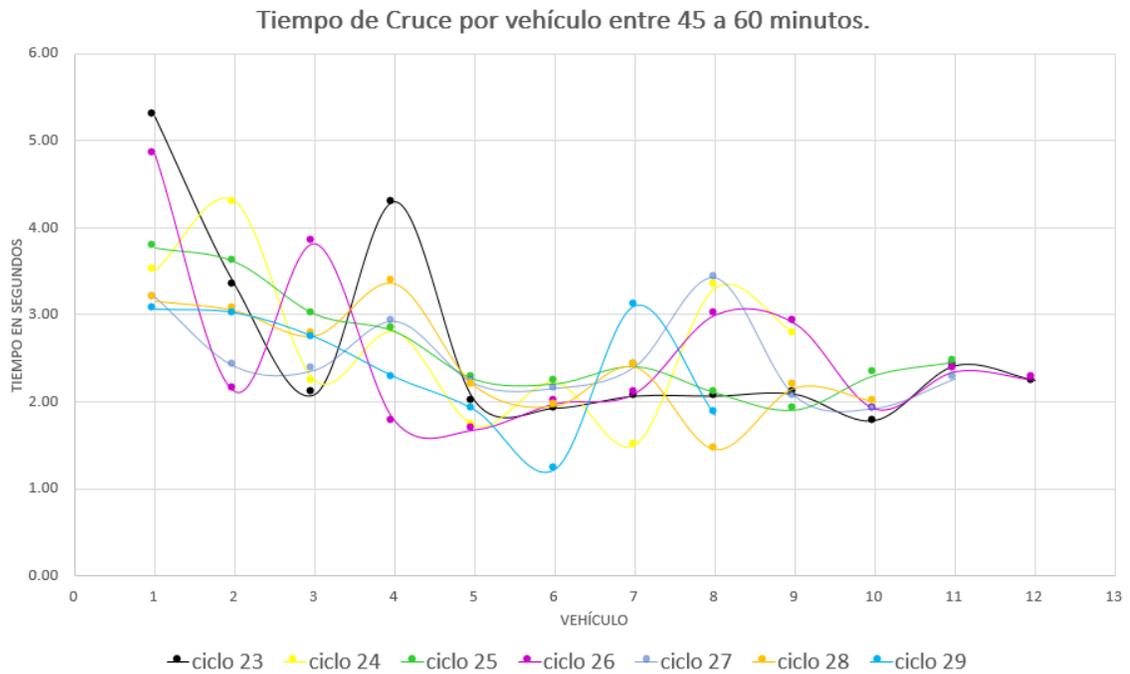


Figura 23. Tiempo de cruce por vehículo entre 15 y 30 minutos  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 24.** Acceso: la Mar – Parque de las Leyendas. Toma de datos entre 30 y 45 minutos. Fuente: Elaboración Propia.



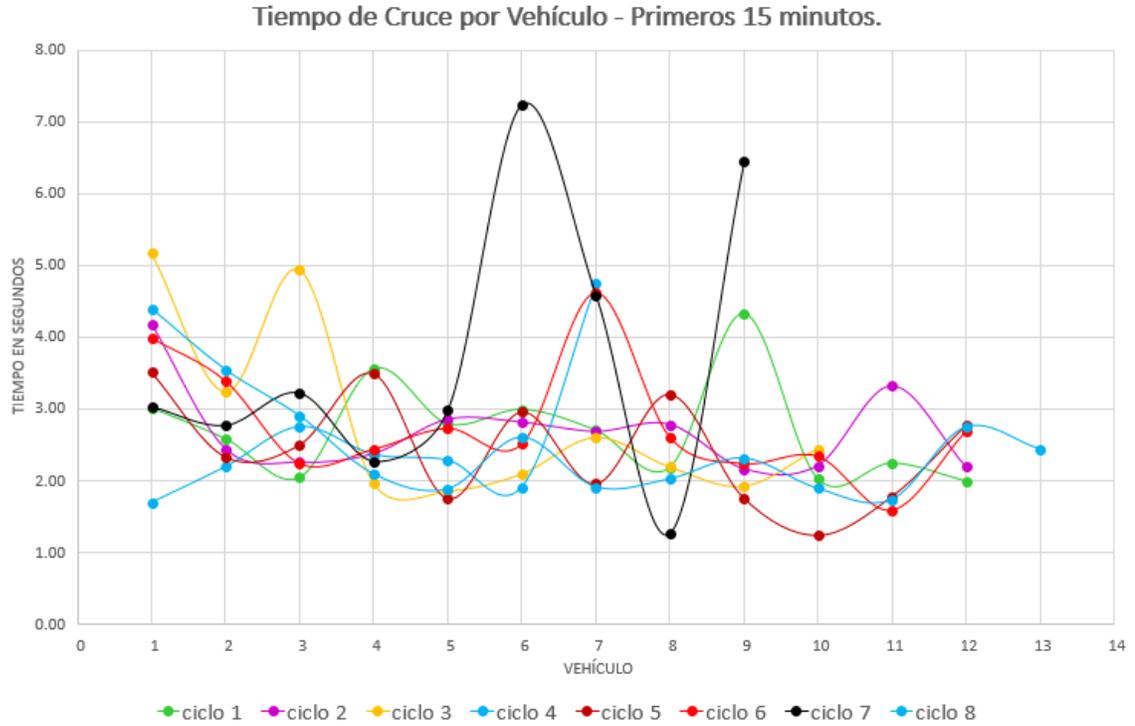
**Figura 25.** Acceso: la Mar – Parque de las Leyendas. Toma de datos entre 45 y 60 minutos. Fuente: Elaboración Propia.

Las figuras anteriores muestran los distintos periodos a lo largo de los cuales se han recolectado los datos dentro del acceso La Mar con rumbo hacia el parque de las leyendas, los tiempos de cruce para cada uno de los vehículos no siguen un patrón decreciente y con una tendencia a estabilizarse en el transcurso del tiempo tal y como lo menciona la metodología del HCM 2010. Esto obedece a lo mencionado en el capítulo de metodología el efecto de percepción reacción. Dicho efecto es muy distinto y varía de conductor a conductor lo cual ocasiona que se generen gráficos como estos (sin una similitud o tendencia entre sí) a pesar de que dichos tiempos pertenecen a una misma intersección.

Es importante resaltar que a lo largo de cada uno de los ciclos el número de vehículos que cruzan la intersección no es el mismo. Esto es debido a que dentro de cada ciclo se desarrollaron eventos que dificultan el flujo normal de vehículos; dichos eventos son distintos desde peatones que cruzan el acceso durante el periodo de verde para los vehículos, hasta la distracción de un conductor que generará el retraso del avance de la cola.

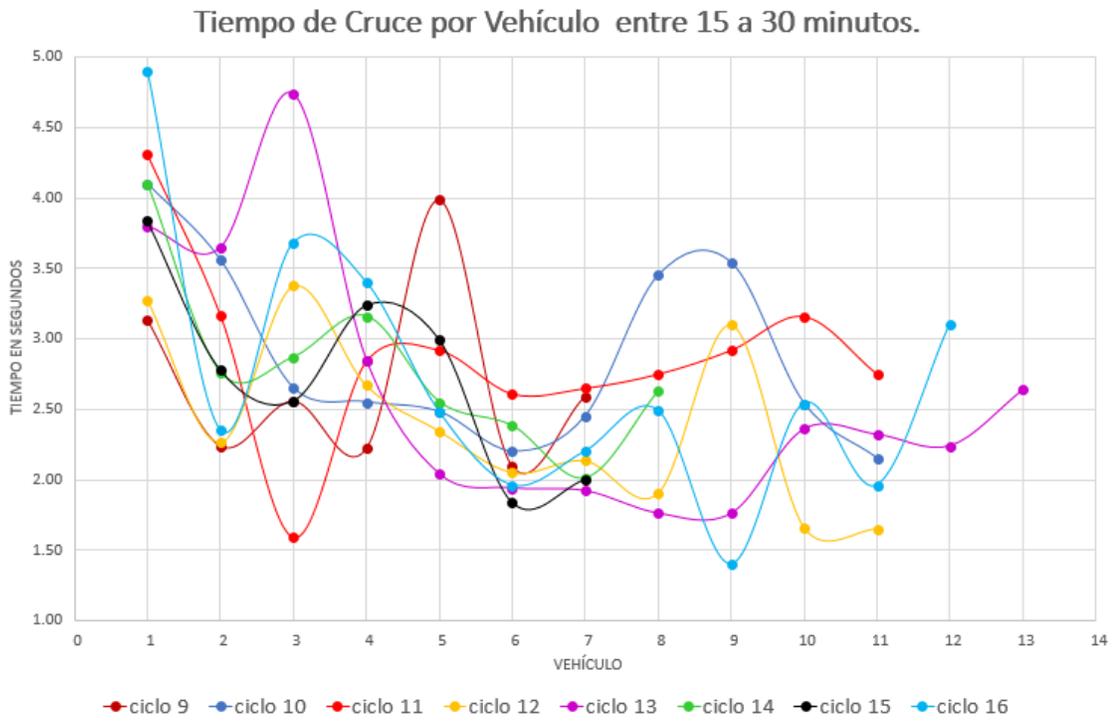
Es importante mencionar que en este acceso no se presentó un número significativo de buses; sin embargo, la poca cantidad presente generó tiempos de espera considerables dentro de la cola. Dichos tiempos no fueron considerados dentro de la toma de datos lo cual implica que los tiempos mostrados pertenecen solo a vehículos particulares o taxis.

A continuación, los gráficos siguientes corresponden al acceso La Mar con rumbo hacia la avenida Sucre. Luego de mostrar los ciclos correspondientes, se procederá a comentar los tiempos de cruce para cada uno de los vehículos.



**Figura 26.** Acceso: la Mar – Avenida Sucre. Toma de datos 15 primeros minutos.

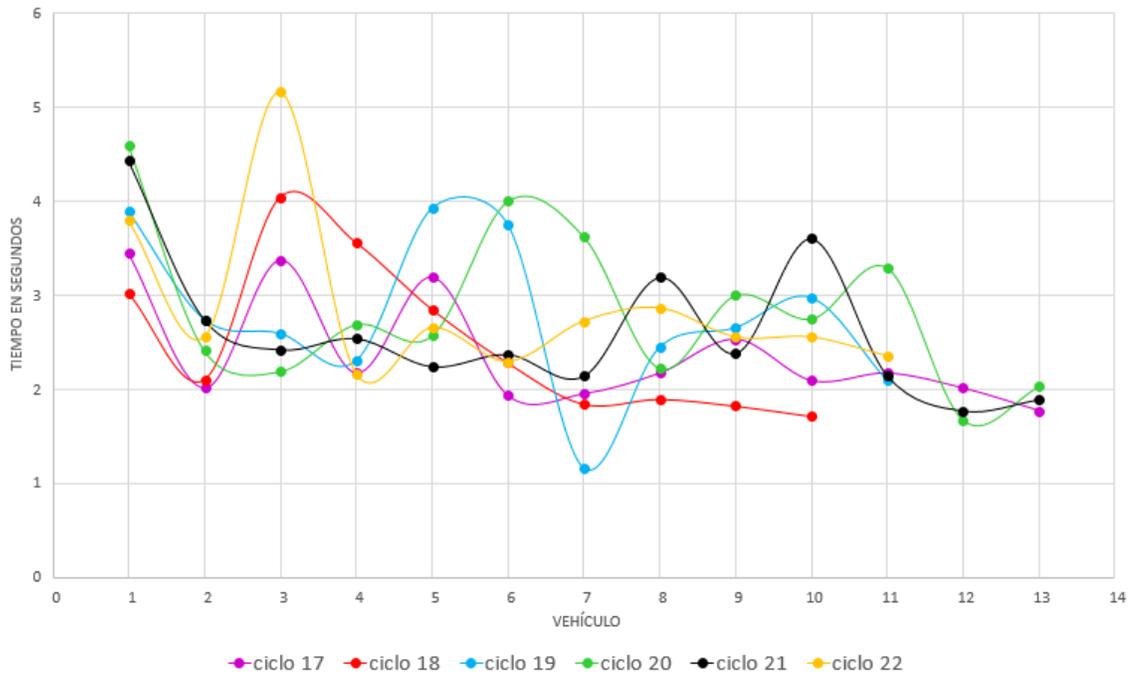
Fuente: elaboración propia



**Figura 27.** Acceso: la Mar – Avenida Sucre. Toma de datos entre 15 y 30 minutos.

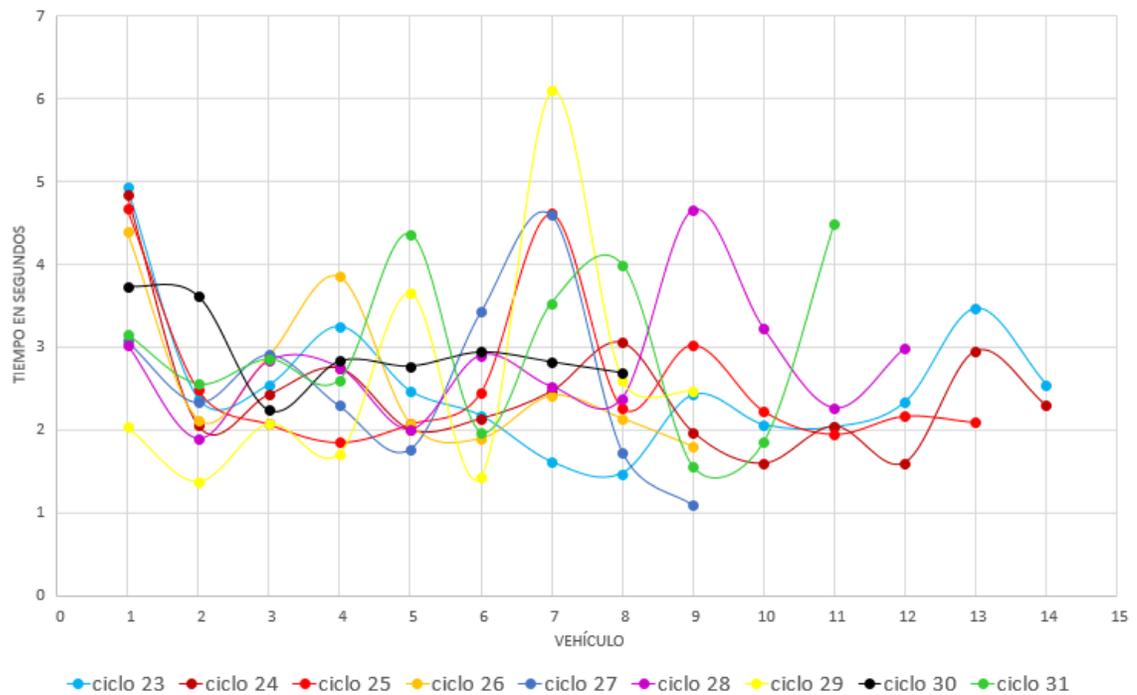
Fuente: elaboración propia

Tiempo de Cruce por Vehículos entre 30 a 45 minutos.



**Figura 28.** Acceso: La Mar – Avenida Sucre. Toma de datos entre 30 y 45 minutos.  
Fuente: elaboración propia

Tiempo de Cruce por Vehículos entre 45 a 60 minutos.



**Figura 29.** Acceso: La Mar – Avenida Sucre. Toma de datos entre 45 y 60 minutos.  
Fuente: elaboración propia

En este caso el acceso La Mar con rumbo hacia la avenida Sucre, se aprecia que no existe un patrón definido en el tiempo de cruce para cada vehículo y mucho menos se asemeja al comportamiento al cual hace referencia la metodología del HCM 2010.

En el trabajo de campo realizado para este acceso se observó que, a diferencia del acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas, sí se presentó una mayor cantidad de buses. Sin embargo, fueron pocos los cuales originaron una demora en la cola ya que estos se desplazaron a través del acceso casi sin ocasionar congestión.

Con respecto a los valores máximos de los tiempos de cruce y que generan picos intermedios en los distintos ciclos, estos se produjeron debido a que algunos vehículos particulares exhibían un comportamiento imprudente. Debido a que muchos de estos corresponden a conductores que están distraídos debido a que estaban usando el teléfono celular, otros hablando con el copiloto y finalmente algunos que simplemente están distraídos con la música del vehículo.

El efecto de percepción reacción, que es el motivo principal por el cual los tiempos de cruce para cada vehículo no tienden a un valor constante refleja, y esto se corrobora con el trabajo de campo, el comportamiento tan diverso y los distintos estilos de manejo entre los conductores que arriban a este acceso. Se aprecia que la mayoría de los conductores presenta un estilo de manejo agresivo el cual se caracteriza por maniobras para adelantar al vehículo inmediatamente delante de este y así cruzar antes la intersección e incluso en algunos casos el “cierre a otro vehículo” para obtener la posición deseada.

En este acceso hubo un flujo mayor de vehículos particulares y esto debido a que esta vía está próxima al centro comercial plaza San Miguel. Siendo esta una de las razones por las cuales, en los gráficos, se observa que un mayor número de autos cruza la línea de parada. A pesar de que en algunos de los ciclos se observa un tiempo pico (entre 5 y 6 segundos) este retraso es compensado por el estilo agresivo de manejo de los que en su afán de cruzar la intersección antes del término de verde, aceleran uno detrás de otro para conseguir abandonar el acceso primero.

En algunos de los intervalos de tiempo se observan ciclos con una cantidad de vehículos entre 7 y 9. Esto se debe a que en determinados momentos se produjeron conflictos direccionales dentro de la intersección y fue debido a esto que la número de vehículos que cruzó la intersección fue baja.

#### 5.4. Flujo de saturación

Representa la tasa máxima de descarga de la cola de vehículos durante el tiempo de verde efectivo. La **tabla 13** muestra los flujos de saturación por acceso y por cada quince minutos

**Tabla 13.** Flujos de saturación en cada periodo de tiempo y por acceso.  
Fuente: Elaboración propia

Acceso	La Mar – parque de las leyendas	La Mar – Avenida Sucre
Hora	S(vehículos/h)	S(vehículos/h)
19:00 – 19:15	1386	1311
19:15 – 19:30	1338	1328
19:30 – 19:45	1430	1354
19:45 – 20:00	1441	1344

Conforme a lo mencionado en el párrafo anterior y con los resultados que se muestran en la tabla 13, se puede concluir que para cada uno de los periodos el que posee el rumbo desde La mar hacia el Parque de las Leyendas es más eficiente que el segundo.

El acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas funciona de manera más eficiente debido a que no se presenta un comportamiento tan agresivo en la forma de conducir por parte de los conductores como sí es el caso del acceso con rumbo hacia la avenida Sucre siendo este comportamiento el principal responsable en la obtención de estos parámetros.

En promedio los valores para el acceso con dicho rumbo son mayores en un 5 % en todos los intervalos de tiempo analizados lo cual verifica lo que se observó al momento de realizar la toma de datos en campo.

### 5.5. Demanda, Capacidad y Grado de Saturación

A continuación, se presenta la **tabla 14** como un resumen de la información obtenida para ambos accesos.

**Tabla 14.** Parámetros para el cálculo de la cola excedente por acceso.  
Fuente: Elaboración propia

Acceso	La Mar – Parque de las Leyendas			La Mar – Avenida Sucre		
	Demanda (veh/h)	capacidad (veh/h)	X	Demanda (veh/h)	capacidad (veh/h)	X
0:00 - 15:00	720	670	1.07	792	634	1.25
15:00 - 30:00	752	647	1.16	692	642	1.08
30:00 - 45:00	784	691	1.13	712	654	1.09
45:00 - 60:00	820	696	1.18	880	649	1.36

El valor de la demanda en vehículos por hora se obtuvo mediante la medición directa en campo. Los datos de este parámetro fueron recolectados en intervalos de 15 minutos los cuales fueron llevados a una hora mediante una regla de tres simple.

Al analizar los valores resultantes para cada uno de los accesos y dentro de cada uno de los periodos correspondientes, se aprecia que en el acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas existe una demanda que se incrementa en aproximadamente un valor promedio de 4% conforme transcurre el tiempo de estudio.

Debido a que el flujo vehicular tiende a incrementarse conforme transcurre el tiempo, puede considerarse como un resultado esperado. Sin embargo, esta tendencia no se refleja de igual manera en el acceso con rumbo hacia la avenida Sucre ya que al analizar los intervalos de tiempo es en el segundo intervalo, de 15 a 30 minutos, que se observa una disminución de este parámetro, en aproximadamente un 13%, lo cual manifiesta una disminución en el flujo vehicular y por ende un comportamiento atípico. Sin embargo esto cambia en el intervalo de tiempo entre 30 a 45 minutos y entre los 45 a 60 minutos ya que aprecia un incremento entre uno y otro periodo de tiempo este incremento es de un 3% y un 24% respectivamente.

El valor del tiempo de verde y del ciclo de semáforo es de 29 y 120 segundos respectivamente para ambos accesos. Por ello, en este trabajo la capacidad quedará definida únicamente por el valor del flujo de saturación el cual, como ya fue mencionado en el acápite anterior, es considerado como un parámetro de eficiencia en un acceso perteneciente a una intersección semaforizada.

En base a los resultados obtenidos y al análisis realizado para el flujo de saturación, se puede concluir que al igual que este parámetro la capacidad calculada para cada uno de los accesos dentro de los periodos de tiempo de análisis es mayor en el acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas. Esto al igual que el flujo de saturación se debe al estilo de manejo agresivo que presentan los usuarios además de la geometría propia del acceso que influye en el valor de dicho parámetro.

Debido a que el grado de saturación se define como la relación entre la oferta y la demanda vehicular, la importancia de este parámetro radica en que muestra, de una manera sencilla, el balance entre la demanda y la capacidad vehicular. Es por ello que, a mayor valor de grado de saturación, mayor será la congestión en el acceso.

Como se aprecia en la **tabla 14** el valor del grado de saturación para los primeros quince minutos es mayor en el acceso con rumbo a la avenida Sucre. Esto concuerda con el nivel de congestión que se observó en campo y además con los valores obtenidos tanto para la demanda como para la capacidad. La cantidad demandada es mayor y la

capacidad menor que en el acceso hacia el parque de las leyendas lo cual genera un grado de saturación de 1.25.

Para los intervalos de 30 y 45 minutos el valor del grado de saturación disminuye en el acceso con rumbo hacia la avenida Sucre en comparación con el acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas el cual posee un valor de grado de saturación mayor y esto debido al aumento de la demanda como de la capacidad.

Finalmente, esta situación cambia en los últimos 15 minutos de la toma de datos. La demanda en el acceso hacia la avenida Sucre aumenta y la capacidad disminuye (comparando estos parámetros con los del otro acceso). Como resultado de esto, el grado de saturación tiene un valor de 1.36. Esto implica que este acceso se encuentra, dentro del último periodo de tiempo de análisis, más congestionado que el acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas.

## 5.6. Máxima cantidad de vehículos, cola excedente y cola medida en campo

A continuación la **tabla 15** muestra estos parámetros ordenados por periodo de tiempo en minutos y por acceso.

**Tabla 15.** Máxima cantidad de vehículos que abandonan el acceso, Cola Excedente teórica y cola excedente medida en campo.

Fuente: Elaboración propia

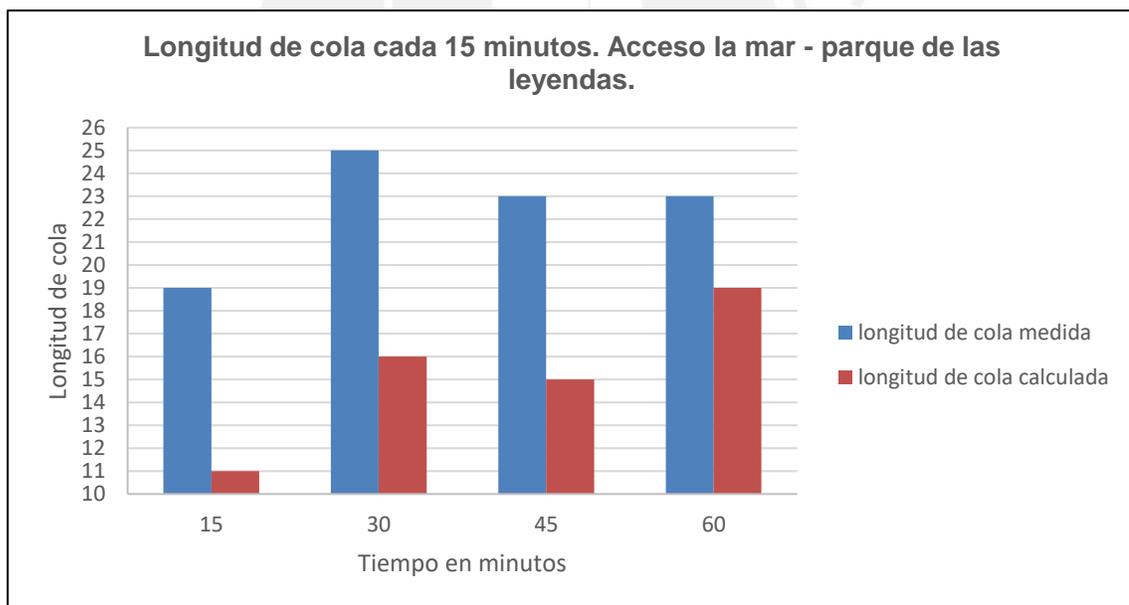
Acceso	La Mar – parque de las leyendas			La Mar – Avenida Sucre		
Minuto	$Qt$	$N_0$	Longitud de cola medida	$Qt$	$N_0$	Longitud de cola medida
15:00	168	11	19	159	23	16
30:00	162	16	25	161	11	13
45:00	173	15	23	164	11	19
60.00	174	19	23	162	32	20

De acuerdo a Akcelik el parámetro “Qt” representa el número máximo de vehículos que puede ser descargado dentro de un determinado intervalo de tiempo en este caso 15 minutos. Una primera comparación refleja que entre ambos accesos y por cada intervalo no existe una gran diferencia entre ambos con lo cual se puede afirmar que dentro del intervalo de estudio, y al tener este parámetro una relación con la capacidad y esta a su vez con el flujo de saturación se cumplirá lo que se vio para el flujo de saturación.

La valores de longitud de cola calculados mediante el empleo de la fórmula derivada de la transformada de Whiting ( $N_0$ ) corresponden a los valores calculados para el grado de saturación (a mayor grado de saturación, mayor longitud de cola).

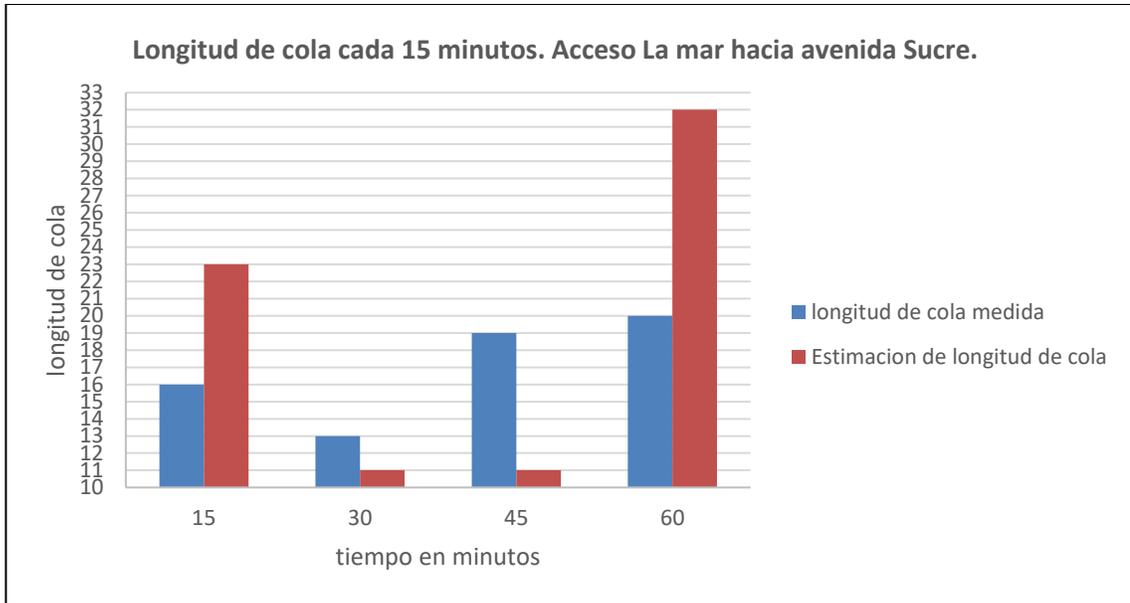
Sin embargo cuando se comparan los valores de longitud de cola calculados con los valores de longitud de cola medidos directamente de campo se puede ver que no coinciden entre sí.

A continuación se presentan dos gráficos que muestran las diferencias entre ambos valores.



**Figura 30.** Comparación entre longitud de cola medida y calculada

Fuente: elaboración propia



**Figura 31.** Comparación entre longitud de cola medida y calculada

Fuente: elaboración propia

Tanto la tabla 13 como las figuras 30 y 31, muestran que existe una marcada diferencia entre el valor teórico y el valor medido en campo de la longitud de cola; con excepción de la cola medida en el acceso con rumbo hacia la avenida Sucre en el segundo intervalo de tiempo medido.

En el acceso hacia el parque de las leyendas, la longitud de cola medida en campo es, durante todos los intervalos de tiempo, mayor que la longitud de cola teórica en los siguientes porcentajes 73, 56, 53 y 21 % respectivamente. Mientras que en el acceso hacia la avenida Sucre, tanto en los primeros como en los últimos 15 minutos la longitud de cola estimada es mayor que la longitud de cola medida. Mientras que en el segundo y tercer intervalos la longitud de cola estimada es menor que la cola medida en el campo.

Este tipo de resultados, en el cual la estimación de un parámetro varía de un acceso a otro a pesar de pertenecer a la misma intersección, refleja la gran variabilidad de resultados que pueden presentarse y esto debido al comportamiento de los usuarios y su estilo de manejo en una vía de dos carriles dentro de periodo en el cual se presenta congestión vehicular.

Por ello, puede inferirse que los resultados presentados mediante el uso de una ecuación determinística no son capaces de representar con exactitud lo que sucede en la realidad dentro de un acceso que pertenece a una intersección semaforizada.

## 6. Conclusiones

Como se ha mostrado en el análisis de resultados, en ambos accesos y dentro de todos los intervalos de tiempo analizados se da la condición de  $X > X_0$  lo cual implica, dentro de la formulación teórica, que la cola calculada no es cero. De igual manera el grado de saturación que se presenta en cada uno de los accesos es mayor a 0.7 lo cual indica que efectivamente, de manera teórica, existe una longitud de cola excedente.

Tanto los conductores de transporte público, privado, motociclistas, ciclistas y los peatones constituyen, en conjunto, un elemento importante y activo en el desarrollo del tránsito vehicular. Por ello, se considera pertinente comentar tanto el comportamiento y el estilo de manejo durante la recolección de datos. En su afán de cruzar la intersección antes del cambio a rojo, algunos conductores adelantaban a los vehículos cerrando el paso a los demás; otros, presentaron un alto nivel de distracción al conducir, por el uso del teléfono celular, un alto volumen de la música o el conversar con el copiloto. Ambas conductas generaran congestión.

La diferencia en el número de vehículos de transporte público en cada acceso es un dato importante debido a su influencia en el flujo de saturación. El acceso con rumbo hacia la avenida Sucre es el que posee mayor número de vehículos de este tipo. Como el flujo de saturación es un parámetro que depende tanto de la composición del tráfico (porcentaje de vehículos de transporte público y privado), del comportamiento y estilo de manejo de los conductores, la hora del día y el tipo de vía, este puede variar bajo distintas condiciones de tráfico. Es debido a esto que se resalta el hecho que el flujo de saturación, en esta investigación, está definido solamente por la composición del tráfico y el estilo de manejo de los conductores. Esto se debe a que la toma de datos fue realizada en un mismo día y a un mismo tipo de vía para ambos accesos.

El tiempo de percepción reacción medido en campo muestra una tendencia oscilatoria y que con el transcurso del tiempo no tiende a un valor estable. Esto corrobora las observaciones de campo en cuanto al estilo de manejo teniendo en cuenta además la influencia del transporte público tanto sobre este parámetro como también sobre el flujo vehicular.

El flujo de saturación es menor en el acceso con rumbo hacia la avenida Sucre debido al mayor número de vehículos de transporte público. Esto se debe a que las dimensiones de un bus son mayores que las de un automóvil lo cual impide el desplazamiento normal

de vehículos, a su menor capacidad de aceleración frente al automóvil; además de un estilo de manejo agresivo en algunos conductores y la falta de atención al momento de continuar la marcha de otros lo cual genera demoras en el avance de la cola y por ende una mala circulación a nivel vehicular.

El grado de saturación calculado, en cada uno de los ciclos de análisis, refleja que a mayor grado de saturación mayor longitud de cola calculada. Esta afirmación no es correcta cuando se compara este parámetro con la cola medida en campo. Por ejemplo, en el primer ciclo se obtuvo, para el acceso con rumbo hacia el parque de las leyendas, un grado de saturación de 1.07, una longitud de cola calculada de 11 y una longitud de cola medida de 19; mientras que para el otro acceso un grado de saturación de 1.25, una longitud de cola calculada de 23 y una longitud de cola medida de 16.

La variación tan marcada entre las longitudes de cola medidas y los valores de grado de saturación obedece a la naturaleza del tipo de modelo que se usó para realizar el estudio. La ecuación transformada obedece a un modelo determinístico el cual, en base al empleo de formulaciones algebraicas y sin el uso de técnicas de simulación, calcula el parámetro deseado; mientras que la formación de colas obedece a un proceso estocástico que se rige por un mecanismo cíclico y cuyo comportamiento es influenciado tanto por la llegada y salida de los vehículos de la intersección, las cuales son acciones que poseen un carácter probabilístico, como por los vehículos de transporte público, cuyas dimensiones y menor capacidad de aceleración son factores que no contempla la expresión transformada debido a que este modelo solo considera automóviles.

Por ello se afirma que la expresión teórica de Whiting, para el caso de una intersección semaforizada en la ciudad de Lima, no brinda valores semejantes a la longitud de cola medida en campo debido principalmente a la naturaleza de la formación de colas, de la cantidad de vehículos de transporte público y el tiempo de percepción reacción que está asociado directamente al estilo de manejo en el área de estudio. Cabe resaltar que lo mencionado anteriormente hace complejo el análisis de cualquier fenómeno relacionado con el tránsito y que cualquiera sea el procedimiento aplicado para implementar u ofrecer alguna solución podría ofrecer resultados óptimos en un lugar mientras que resultados sin sentido en otro.

Todo lo mencionado anteriormente hace que el análisis de cualquier fenómeno de tránsito sea complejo y es por ello que cualquier procedimiento que quiera llevarse a cabo para ofrecer una solución a un problema en específico podría brindar buenos resultados en un lugar y resultados totalmente absurdos en otro.

En situaciones reales los vehículos no arriban o abandonan la intersección a intervalos constantes de tiempo. Sin embargo a tasas de llegadas bajas es probable que la mayoría de los ciclos comiencen y finalicen con una cola de valor cero.

A medida que se incrementa la intensidad del tráfico, también aumentará la probabilidad de que algunos ciclos empiecen o finalicen con una cola de desbordamiento.

Si se tiene en cuenta que la mayoría de dispositivos de control en la realidad operan durante las denominadas horas pico con valores cercanos a la saturación total o excediendo esta, se puede inferir que la modelación de estos efectos y la probabilidad de ocurrencia son parámetros importantes. Es por ello que a medida que aumenta la intensidad del tráfico, aumentará la probabilidad de que algunos ciclos empiecen o finalicen con una cola de desbordamiento.

Una forma más sencilla de considerar el proceso de colas de desbordamiento como dependiente del tiempo es usar colas determinísticas. Estas se basan en una ecuación simple de balance de masas. Sin embargo, los resultados que utilizan este enfoque no explican el proceso temporal de colas en condiciones cercanas a la capacidad debido a la variabilidad propia de las llegadas y salidas. Por esta razón Kimber y Hollis asumieron que en condiciones cercanas a la capacidad y con un periodo de evaluación finito  $T$ , la evolución de las colas debería ser una combinación de las dos tendencias la cual se obtiene cuando se aplica la transformación de coordenadas (transformada de Whiting).

Aunque este enfoque supera la brecha entre los modelos estáticos de estado estacionario y los modelos deterministas dependientes del tiempo, no representa un enfoque teóricamente válido, sino un enfoque heurístico.

No obstante este enfoque aún se adapta después de casi 30 años ya que también se utiliza el componente de retraso estocástico en los manuales estadounidense (TRB, 2010), Canadiense (TEPLY, 1984) y Australiano (Miller, 1986). Este enfoque inspiró a Akcelik para la derivación de la fórmula de cola de desbordamiento que depende del tiempo.

La demanda posee fluctuaciones que se dan durante el transcurso del día, además que varía día tras día. Dicha demanda, es un factor dominante y deberá de tenerse en cuenta para los problemas prácticos y de investigación.



## Referencias

- 1 Akçelik, R. (1980). Time-dependent expressions for delay, stop rate and queue length at traffic signals. Melbourne,, Australia: Australian Road Research Board.
- 2 Akçelik, R., & Roupail, N. (1993). Estimation of delays at traffic signals for variable demand conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*,27(2), 109-131.
- 3 Bertin, M. Definicion de un plan único de operación para semáforo aislado. Recuperado de <http://www.sochitran.cl/wp-content/uploads/Acta-1985-04-01.pdf>
- 4 Bronson, R.(1983). Investigación de operaciones. McGraw-Hill.
- 5 Cal, R., & Mayor, J. (1996). *Ingeniería de tránsito*. Cúspide.
- 6 Fernández, R. (2011). Elementos de la teoría del tráfico vehicular (pp. 40-48). Lima: PUCP. Fondo Editorial, 2011.
- 7 Gibson, J. (2001). Teoría de Flujos Vehiculares, Apuntes de Clase. Recuperado de [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/CI73I/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=203202](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/CI73I/1/material_docente/bajar?id_material=203202).
- 8 Hadiuzzaman, M., Rahman, M. & Karim, M. (2009). Saturation flow model at signalized intersection for non-lane based traffic. *Canadian Journal of Transportation*, 2(1).
- 9 Kimber, R. & Daly, P. (1986). Time-dependent queueing at road junctions: observation and prediction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(3), 187-203.
- 10 Larraín de Andraca, A. I. (2012). Consideraciones para la estimación de demoras en intersecciones semaforizadas.
- 11 Law,A. (2015).Simulation modeling and analysis. Singapore: McGraw-Hill
- 12 Ministerio de transportes y comunicaciones (2015), informes y publicaciones / transportes. Recuperado de <http://www.mtc.gob.pe/estadisticas/transportes.html>
- 13 Radelat, G. (1964). *Manual de ingeniería de tránsito*. Reuben H. Donnelly Corporation.
- 14 Roess, R, Prassas, E. & McShane, W. R. (2011). *Traffic engineering*.
- 15 Roupail, N., Tarko, & Li, J. (1992). Traffic flow at signalized intersections. *Traffic Flow Theory–A State-of-the-art report*.

- 16 Rubio-Terrés, C. (2000). Introducción a la utilización de los modelos de Markov en el análisis farmaeconómico. *Farm Hosp*, 24(4), 241-247.
- 17 Taha, H. (2012). Investigación de operaciones. Pearson Educación.
- 18 Taylor, N. (2007). A new approach to modelling variability in traffic queues. In *Proceedings of the European Transport Conference 2007 Held 17-19 October 2007, Leiden, The Netherlands*.
- 19 Taylor, N. & Heydecker, B. (2014). The effect of green time on stochastic queues at traffic signals. *Transportation Planning and Technology*, 37(1), 3-19.
- 20 Manual, Highway Capacity. HCM2010. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 2010.
- 21 Zukerman, M. (2013). Introduction to queueing theory and stochastic teletraffic models. *arXiv preprint arXiv:1307.2968*.
- 22 Viti, F., & Van Zuylen, H. J. (2010). Probabilistic models for queues at fixed control signals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(1), 120-135.

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**APLICABILIDAD DE LA TRANSFORMADA DE WHITING PARA  
DETERMINAR COLAS EN UNA INTERSECCIÓN  
SEMAFORIZADA DE LA CIUDAD DE LIMA.**

Tesis para optar el título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

**Abel Enrique Ramirez Dipas**

**Asesor: MSc. Félix Israel Cabrera Vega**

Lima, agosto 2019

# Índice

<b>Anexos</b> .....	1
---------------------	---

## Tabla de Figuras

<b>Figura 1.</b> Intersección de las avenidas La mar y Universitaria. ....	2
<b>Figura 2.</b> Acceso a la avenida La mar (Sentido hacia la avenida Sucre).....	2
<b>Figura 3.</b> Acceso a la avenida La mar (Sentido: Hacia el parque de las Leyendas).....	3
<b>Figura 4.</b> Acceso a la avenida Universitaria. (Sentido: Hacia Universidad Católica) .....	3
<b>Figura 5.</b> Acceso a la avenida Universitaria. (Sentido: Hacia Avenida la Marina) .....	4
<b>Figura 6.</b> Ciclovía de Doble Sentido en la zona Central de la Avenida Universitaria. (Sentido: hacia universidad Católica).....	4
<b>Figura 7.</b> Ciclovía de Doble Sentido en la Zona Central. (Sentido: Hacia avenida La Marina).....	5
<b>Figura 8.</b> Isla refugio en la zona Central de la intersección. ....	5
<b>Figura 9.</b> Formación de la Cola Excedente. Acceso: La Mar hacia parque de las Leyendas. ....	6
<b>Figura 10.</b> Conteo de Cola Excedente. Acceso: La Mar hacia parque de las Leyendas.	7
<b>Figura 11.</b> Formación de la Cola Excedente. Acceso: La Mar hacia Avenida Sucre. ....	8
<b>Figura 12.</b> Conteo de cola Excedente. Acceso: La Mar hacia Avenida Sucre. ....	9



# Anexos



**Figura 1.** Intersección de las avenidas La mar y Universitaria.

Fuente: propia



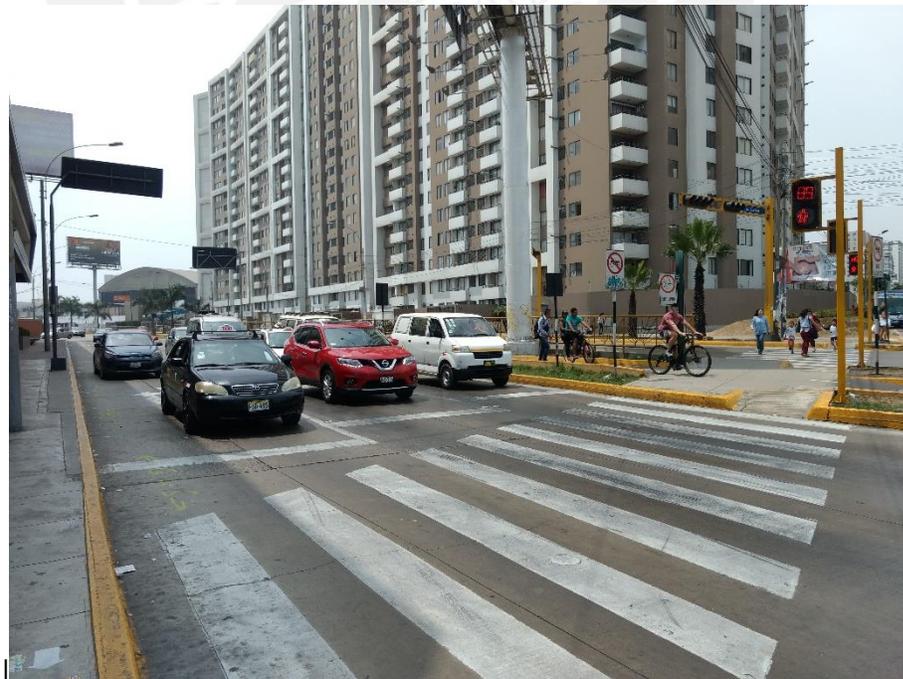
**Figura 2.** Acceso a la avenida La mar (Sentido hacia la avenida Sucre).

Fuente: propia.



**Figura 3.** Acceso a la avenida La mar (Sentido: Hacia el parque de las Leyendas).

Fuente: propia.



**Figura 4.** Acceso a la avenida Universitaria. (Sentido: Hacia Universidad Católica)

Fuente: propia



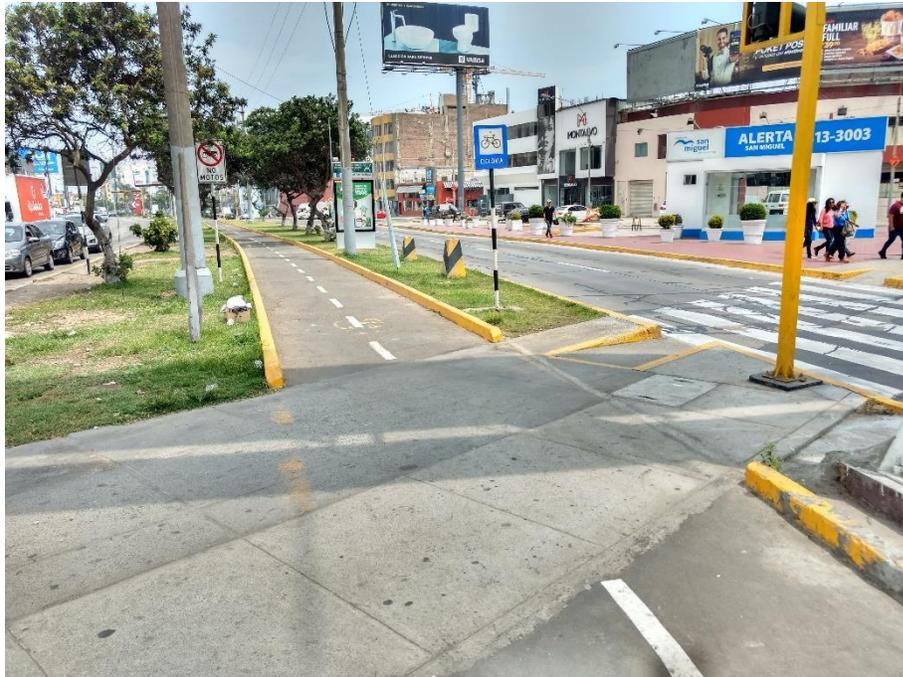
**Figura 5.** Acceso a la avenida Universitaria. (Sentido: Hacia Avenida la Marina)

Fuente propia



**Figura 6.** Ciclovía de Doble Sentido en la zona Central de la Avenida Universitaria. (Sentido: hacia universidad Católica)

Fuente: propia.



**Figura 7.** Ciclovía de Doble Sentido en la Zona Central. (Sentido: Hacia avenida La Marina).

Fuente: propia.



**Figura 8.** Isla refugio en la zona Central de la intersección.

Fuente: propia



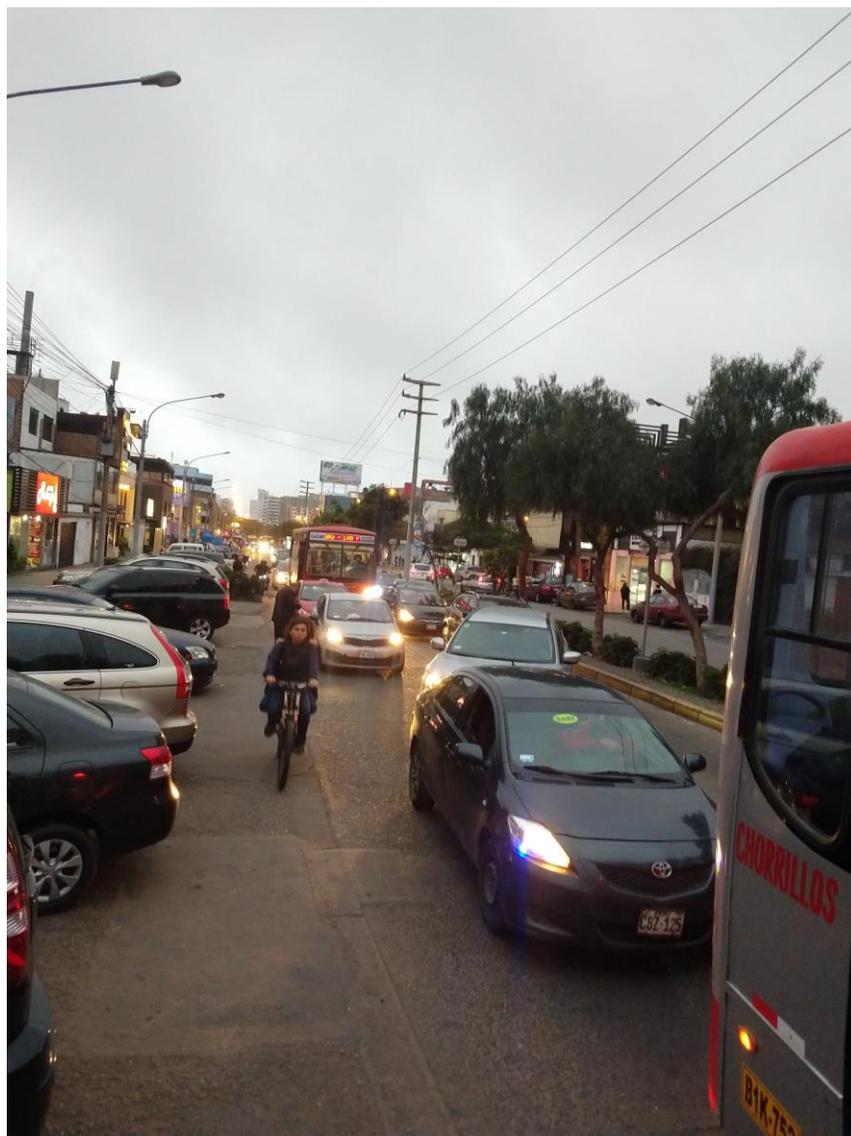
**Figura 9.** Formación de la Cola Excedente. Acceso: La Mar hacia parque de las Leyendas.

Fuente: propia



**Figura 10.** Conteo de Cola Excedente. Acceso: La Mar hacia parque de las Leyendas.

Fuente: propia



**Figura 11.** Formación de la Cola Excedente. Acceso: La Mar hacia Avenida Sucre.

Fuente: propia



**Figura 12.** Conteo de cola Excedente. Acceso: La Mar hacia Avenida Sucre.

Fuente: propia