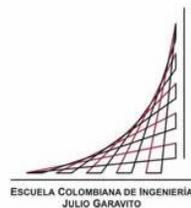


# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Demoras y tiempos de atención en estaciones de peaje**

**Néstor Orlando Correal Rodríguez**

**Bogotá, D.C., 17 de noviembre de 2014**



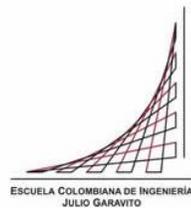
# **Demoras y tiempos de atención en estaciones de Peaje**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Tránsito y Transporte**

**Santiago Henao Pérez**

**Director**

**Bogotá, D.C., 17 de noviembre de 2014**



La tesis de maestría titulada “Demoras y tiempos de atención en estaciones de peaje”, presentada por Néstor Orlando Correal Rodríguez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

Director de la Tesis

---

Dr. Santiago Henao Pérez

Jurado

---

Ing. Maritza Cecilia Villamizar Roperó

Jurado

---

Ing. María Fernanda Ramírez Bernal

Bogotá, D.C., 30 de abril de 2015

### Dedicatoria

A mi familia, quienes me apoyaron durante todo este proceso de la maestría, compartiendo su tiempo para que yo pudiera dedicarlo al estudio.

A mis hijos, para que el ejemplo que les doy sirva para que estudien y se capaciten permanentemente, y que entiendan que la edad y las obligaciones que se tienen no son obstáculos para formarse si es lo que uno desea.

A mi madre, quien siempre ha sido un ejemplo de vida y de permanente compromiso.

## Agradecimientos

Especial agradecimiento a Cano Jiménez Estudios S.A. en cabeza del Ing. José Gabriel Cano Hernández, quien desde su Empresa me impulsó a continuar con mi formación y me apoyó para que pudiera realizar mis estudios de Maestría.

De igual manera a mis compañeros de trabajo quienes me apoyaron en la realización de este proyecto de grado, en especial a Juan Gabriel Molina, quien tuvo una participación activa en la realización del mismo.

## Resumen

Las carreteras en Colombia, especialmente las de primer y segundo orden, cuentan con estaciones de recaudo de peaje como medio para el mantenimiento, operación y ampliación de la red nacional de carreteras.

Las estaciones de recaudo de peajes son puntos de aforo permanentes, los cuales reportan periódicamente a los diferentes estamentos gubernamentales los tráficos y recaudos de la tasa de cobro por la utilización de las vías, teniendo cada vía un uso particular debido a las actividades económicas que se desarrollan en las inmediaciones de las estaciones de recaudo. En las vías se observan diferentes composiciones vehiculares las cuales deben ser tenidas en cuenta para la determinación de la infraestructura necesaria para que la operación de recaudo se realice dentro de parámetros de servicio, tanto de colas como de tiempos de atención de los usuarios dentro del sistema.

A pesar de ser conocidas las diversas variables que influyen en la normal operación del recaudo, las cuales generan demoras en la operación de los vehículos que transitan, el único parámetro que es tenido en cuenta es que no se presenten colas superiores a 10 autos o a 5 camiones y en el caso particular de INVIAS, el sistema debe ser capaz de atender 300 veh/hora/carril, dentro de su operación normal.

Las demoras que se presentan en los peajes trae consecuencias como es el mayor deterioro de las vías en inmediaciones de las estaciones de recaudo de peaje, vendedores informales, inseguridad, contaminación, mayores tiempos de viaje, entre otros.

Para determinar los tiempos de atención de las diferentes categorías vehiculares establecidas por INVIAS, se realizó este estudio en 5 estaciones de recaudo con diferentes condiciones de operatividad.

En este trabajo se definen los tiempos de atención por tipo de vehículo, especialmente lo que corresponde a tiempos de despeje, los cuales determinan al final los tiempos de que se requieren para atender el vehículo inmediatamente siguiente. De igual manera establecer las condiciones actuales de las estaciones en estudio y establecer una vida útil residual para prever las obras de infraestructura que requiera para su óptima operación.

El estudio se realizó haciendo mediciones por pelotones para determinar tiempos medios de atención, como resultado final se propone la estandarización para determinar cuántos carriles de recaudo se requieren para establecer un nuevo peaje dependiendo de su composición vehicular o validar la capacidad y eficiencia de los peajes que hoy día están en funcionamiento.

## Índice general

	pág.
Introducción	13
Capítulo 1. Definición del Problema	14
Capítulo 2. Justificación	18
Capítulo 3. Objetivos	19
3.1. Objetivos generales	19
3.2. Objetivos específicos	19
Capítulo 4. Marco Referencial	20
Capítulo 5. Diseño Metodológico	26
Capítulo 6. Resultados y discusión	31
6.1. Estación de recaudo de Peaje Tarapacá II	31
6.1.1. Determinación Hora de máxima demanda semanal	32
6.1.2. Tiempos de atención en el sistema	33
6.1.3. Indicadores operativos	35
6.1.4. Diagnóstico de la situación actual	37
6.2. Estación de recaudo de Peaje Santágueda	39
6.2.1. Determinación hora de máxima demanda semanal	40
6.2.2. Tiempos de atención en el sistema	41
6.2.3. Indicadores operativos	43
6.2.4. Diagnóstico de la situación actual	45
6.3. Estación de recaudo de Peaje Vanguardia	47
6.3.1. Determinación hora de máxima demanda semanal	48
6.3.2. Tiempos de atención en el sistema	49
6.3.3. Indicadores operativos	51
6.3.4. Diagnóstico de la situación actual	53
6.4. Estación de recaudo de Peaje Los Curos	55

## Índice general

	pág
6.4.1. Determinación hora de máxima demanda semanal	56
6.4.2. Tiempos de atención en el sistema	57
6.4.3. Indicadores operativos	59
6.4.4. Diagnóstico de la situación actual	61
6.5. Estación de recaudo de Peaje Saboyá	63
6.5.1. Determinación hora de máxima demanda semanal	64
6.5.2. Tiempos de atención en el sistema	65
6.5.3. Indicadores operativos	67
6.5.4. Diagnóstico de la situación actual	69
6.6. Propuesta de Formulación para Dimensionamiento	71
Capítulo 7. Conclusiones	72
Capítulo 8. Recomendaciones	78
Capítulo 9. Bibliografía	79
Capítulo 10. Anexos	80

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros estación de recaudo de peaje Tarapacá II	35
Tabla 2. Parámetros estación de recaudo de peaje Santágueda	43
Tabla 3. Parámetros estación de recaudo de peaje Vanguardia	51
Tabla 4. Parámetros estación de recaudo de peaje Los Curos	59
Tabla 5. Parámetros estación de recaudo de peaje Saboyá	67

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estación de Recaudo de Peaje Cajamarca.	14
Figura 2. Colas Estación de Recaudo de Peaje Turbaco - Ruta del Sol	15
Figura 3. Estación de Recaudo de Peaje El Roble.	15
Figura 4. Estación de Recaudo de Peaje Circasia.	16
Figura 5. Árbol del problema.	17
Figura 6. Sistema de una cola y un servidor.	23
Figura 7. Sistema una cola y múltiples servidores.	23
Figura 8. Sistema múltiples colas y múltiples servidores.	24
Figura 9. Esquema de una sola cola de canal único.	24
Figura 10. Ubicación estación de recaudo Tarapacá II.	31
Figura 11. Estación de recaudo de peaje Tarapacá II.	32
Figura 12. Tarapacá II - Aforo para determinar hora de máxima demanda	33
Figura 13. Tiempos de atención por categoría Peaje Tarapacá II.	34
Figura 14. Tarapacá II Gráfico $\rho$ vs Longitud promedio cola en el sistema.	35
Figura 15. Ubicación estación de recaudo Santágueda.	39
Figura 16. Estación de recaudo de peaje Santágueda.	40
Figura 17. Santágueda - Aforo para determinar hora de máxima demanda.	41
Figura 18. Tiempos de atención por categoría Peaje Santágueda.	42
Figura 19. Santágueda - Gráfico $\rho$ vs Longitud promedio cola en el sistema.	43
Figura 20. Ubicación estación de recaudo Vanguardia.	47
Figura 21. Estación de recaudo de peaje Vanguardia.	48
Figura 22. Vanguardia - Aforo para determinar hora de máxima demanda.	49

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 23. Tiempos de atención por categoría Peaje Vanguardia.	50
Figura 24. Vanguardia - Gráfico $\rho$ vs Longitud promedio cola en el sistema.	51
Figura 25. Ubicación estación de recaudo Los Curos.	55
Figura 26. Estación de recaudo de peaje Los Curos.	56
Figura 27. Los Curos - Aforo para determinar hora de máxima demanda.	57
Figura 28. Tiempos de atención por categoría Peaje Los Curos.	58
Figura 29. Los Curos - Gráfico $\rho$ vs Longitud promedio cola en el sistema.	59
Figura 30. Ubicación estación de recaudo Saboyá.	63
Figura 31. Estación de recaudo de peaje Saboyá.	64
Figura 32. Saboyá - Aforo para determinar hora de máxima demanda	65
Figura 33. Tiempos de atención por categoría Peaje Saboyá.	66
Figura 34. Saboyá - Gráfico $\rho$ vs Longitud promedio cola en el sistema	67
Figura 35. Grafico para determinación de cola requerida en función de $\rho$ .	71
Figura 36. Colas en función de tasa de arribo.	72
Figura 37. Longitud de colas en función de $\rho$ para los diferentes peajes.	73
Figura 38. Tiempos de atención y despeje por categorías.	76

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Glosario	80
Anexo 2. Tráfico Estación de Recaudo de Peaje Tarapacá II	82
Anexo 3. Tráfico Estación de Recaudo de Peaje Santágueda	83
Anexo 4. Tráfico Estación de Recaudo de Peaje Vanguardia	84
Anexo 5. Tráfico Estación de Recaudo Los Curos	85
Anexo 6. Estación de Recaudo de Peaje de Saboyá	86
Anexo 7. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Tarapacá II	87
Anexo 8. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Santágueda	88
Anexo 9. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Vanguardia	89
Anexo 10. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Los Curos	90
Anexo 11. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Saboyá	91

## Introducción

La palabra Peaje etimológicamente proviene del latín y supone el tránsito a pie: pes, pedis, pie y su definición más elemental es la siguiente: Derecho de tránsito o derecho a cobrar una contribución con carácter de tasa por el servicio que se presta al transeúnte cuando pasa por un camino, puente o canal, ya se trate de personas, animales, vehículos o mercancía lo que ha permitido calificar ciertas formas de peaje con el nombre de Portazgo, Pontazgo, Barcaje y Peaje propiamente dicho.

Los peajes son el principal mecanismo por medio del cual el Gobierno (Nacional, Departamental o Municipal), puede captar recursos para la construcción, operación y mantenimiento de la red vial a cargo de cada entidad.

Las estaciones de recaudo de peaje son elementos físicos que hacen parte de la infraestructura de las vías, que de manera directa afecta el Nivel de Servicio de las vías, ya que en estos puntos se reduce la velocidad de Operación, afectando la capacidad de las mismas.

En los diferentes contratos de concesión deben establecerse indicadores para medir la atención a los usuarios, los indicadores de colas 5 vehículos comerciales o 10 autos, son medidas de capacidad para las colas, pero no mide los tiempos de atención y despeje por parte de los vehículos.

La Ingeniería de tránsito debe estudiar estos tiempos de atención y establecer la infraestructura que se requiere para racionalizar las inversiones de manera que se optimicen los tiempos de atención y la infraestructura propuesta sea suficiente para cumplir con las colas establecidas en los contratos, especialmente en las horas de máxima demanda cuando pueden presentarse congestiones, generando demoras en los desplazamientos por las vías.

Es importante entender las demoras en las líneas de atención, las cuales forman las colas para un análisis correcto y apropiado de sus efectos. Para esto es necesario estudiarlo mediante la teoría de colas, la cual emplea algoritmos matemáticos para describir el proceso que resulta en la formación de las filas, realizándose el análisis de sus resultados. A través de estos algoritmos podemos establecer si la capacidad instalada es suficiente y estimar hasta cuándo podría funcionar adecuadamente. Estos algoritmos matemáticos pueden usarse para determinar la probabilidad para que se obtengan las colas máximas establecidas y las demoras esperadas para ser atendidos los usuarios en el sistema de recaudo.

## Capítulo 1

### Definición del Problema

¿Cómo dimensionar la infraestructura de una estación de Recaudo de Peaje?

Las estaciones de recaudo de peaje es el principal mecanismo con el que cuenta el Gobierno, tanto Nacional como Departamental, para conseguir recursos para mantener, operar y construir la red de carreteras a su cargo, sin tener que recurrir a recursos del gobierno a través de vigencias futuras o de recursos de regalías.

El recaudo de la tasa de peaje se realiza a través de Concesionarios de la Agencia Nacional de Infraestructura, de las Gobernaciones o del Instituto Nacional de Vías.

Los Concesionarios cuentan con infraestructuras para realizar la operación del recaudo de peajes, pero muchas de estas no se han dimensionado de acuerdo al tráfico y colas establecidas como máximo aceptadas en la operación, siendo el requerimiento mayormente establecido que las colas no superen 10 autos o 5 camiones.

En muchas de estas estaciones de recaudo se presentan largas colas, como es el caso del Peaje de Cajamarca en la vía Ibagué – Calarcá, donde constantemente presenta largas, ya que no cuenta con la infraestructura necesaria para atender la demanda de vehículos que transitan por esta estación de recaudo.



Figura 1. Estación de Recaudo de Peaje Cajamarca. Fuente: co.worldmapz.com



Figura 2. Colas Estación de Recaudo de Peaje Turbaco - Ruta del Sol  
Fuente: [www.eluniversal.com.co](http://www.eluniversal.com.co)

En otras estaciones de recaudo de Peaje, principalmente en vías Concesionadas a cargo de la ANI, se han hecho grandes inversiones en infraestructura de Peaje las cuales están sobredimensionadas nunca han operado a su capacidad instalada. Entre estas tenemos la estación de recaudo del Roble de la Concesión BTS y la Estación de Recaudo de Peaje Circasia, conocida como Cruces, perteneciente a la Concesión Autopistas del Café.



Figura 3. Estación de Recaudo de Peaje El Roble Fuente: Cano Jiménez Estudios S.A.



Figura 4. Estación de Recaudo de Peaje Circasia  
Fuente: Cano Jiménez Estudios S.A.

En las Concesiones debe establecerse indicadores de la operación en las Estaciones de Recaudo de Peaje y establecer crecimientos progresivos de los mismos, teniendo en cuenta que de acuerdo a la ley de Asociaciones Público Privadas, las Concesiones pueden llegar hasta 30 años.

Otro factor que afecta la operación de los peajes es el tipo de tecnología empleada para realizar el recaudo. Los hay manuales como los empleados en las Estaciones de INVIAS con bajo tráfico, sistemas de pre y pos clasificación, que son los de mayor uso y sistemas automáticos o telepeajes, los cuales han empezado a ser implementados por algunas Concesiones pero hace falta que el gobierno nacional establezca estándares para su implementación y masificación, de manera que con este sistema mantengan las velocidades medias operacionales en las carreteras, incluso al pasar por sitios de recaudo de peaje.

Con el fin de dimensionar una infraestructura para el recaudo de la tasa de Peaje es importante tener en cuenta varios factores como son:

- ✓ El tráfico de la vía sobre la cual se hace el recaudo.
- ✓ La composición vehicular
- ✓ Tiempo de atención en cabina.
- ✓ Demoras ajenas al sistema.

Debido a que no son tenidos en cuenta aspectos como los anteriormente mencionados:

- ✓ Se presentan en las estaciones de recaudo grandes colas, las cuales generan demoras, mayores costos en transporte, contaminación, mayores costos de mantenimiento, inseguridad, economía informal
- ✓ Se construyen estaciones de recaudo sobredimensionadas, las cuales son pagadas por los usuarios de la vía, ya sea dentro de los costos del modelo financiero o en los ingresos esperados de los contratos.

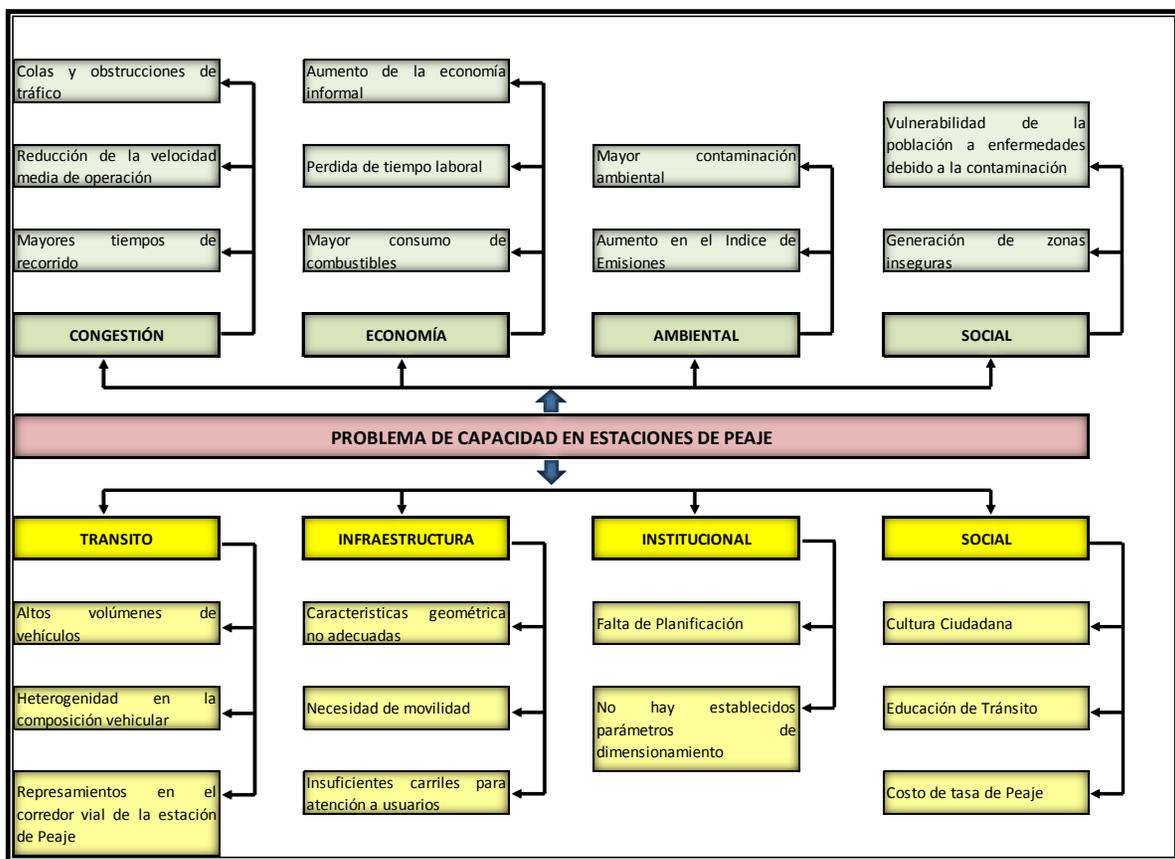


Figura 5. Árbol del problema. Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 2**

### **Justificación**

Este proyecto es importante para el área de tránsito de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte, ya que como resultado del presente Trabajo de Grado se obtendrán indicadores de operación a partir de las mediciones realizadas en diversas estaciones de recaudo de peaje y de igual manera realizar un diagnóstico para determinar si la infraestructura con la cual se cuenta es suficiente para atender la demanda de vehículos dentro del sistema de recaudo.

El problema propuesto es pertinente y relevante para ser abordado como trabajo para optar al Título de Maestría, ya que como se debe establecer el nivel de servicio de una vía y su capacidad, y proyectar las dimensiones de su infraestructura, las estaciones de Peaje son zonas sobre las vías Nacionales y Departamentales que tienen unas particularidades de velocidad media y de capacidad que deben ser tenidas en cuenta particularmente para el dimensionamiento de la infraestructura, de manera que se pueda mantener unos estándares de operación sobre el corredor y se dé cumplimiento a las colas máximas establecidas para cada caso.

## **Capítulo 3**

### **Objetivos**

#### **3.1. Objetivos generales**

Realizar un diagnóstico operacional en diversas estaciones de recaudo de peaje, analizando el funcionamiento del sistema de recaudo, determinando las colas en las horas de máxima demanda, tiempos para ser atendidos por el sistema y tiempo de atención en el sistema, de manera que se puedan establecer los requerimientos para dar cumplimiento a las colas máximas establecidas por las entidades que las han entregado en Concesión.

#### **3.2. Objetivos específicos**

Determinar si la capacidad instalada en los peajes en estudio es suficiente para la atención de la demanda.

Estimación de colas a presentarse en la Hora de Máxima Demanda, dependiendo de las casetas de recaudo instaladas.

Plantear las necesidades de infraestructura requeridas en las estaciones de recaudo de peaje para atender el tránsito y cumplir con los requerimientos contractuales de colas.

## Capítulo 4

### Marco Referencial

En diversos momentos de la vida nos vemos enfrentados al fenómeno de formación de colas y esto ocurre cuando la demanda real de un servicio es superior a la capacidad de atender dicha demanda, y este es el fenómeno que vemos en las estaciones de recaudo de peajes.

El origen de la Teoría de Colas se adjudica al Danés Agner Kraup Erlang (1878 - 1929), quien en 1909 analizó la congestión de tráfico telefónico con el objetivo de cumplir la demanda incierta de servicios en el sistema telefónico de Copenhague. Las investigaciones dieron origen a nueva teoría denominada teoría de colas o de líneas de espera.

Los problemas de formación de colas a menudo contienen una velocidad variable de llegada de clientes que requieren cierto tipo de servicio, y una velocidad variable de prestación del servicio en la estación de servicio.

En la teoría de la formación de colas, se denomina sistema a un grupo de unidades físicas, integradas de tal modo que pueden operar al unísono con una serie de operaciones organizadas. La teoría de la formación de colas busca una solución al problema de la espera prediciendo el comportamiento del sistema. Pero una solución al problema de la espera consiste no solo en minimizar el tiempo que los clientes pasan en el sistema, sino también en minimizar los costos totales de aquellos que solicitan el servicio y de quienes lo prestan.

La teoría de colas proporciona información para la toma de decisiones con el fin de optimizar el sistema, permitiendo unas colas máximas contractualmente establecidas para el tema de estaciones de recaudo de peajes.

Para estudiar de manera apropiada un sistema de filas de espera es necesario conocer su comportamiento, ya que tanto las tasas de llegada como las tasas de servicio varían con el tiempo. El comportamiento de la cola y los modelos necesarios para caracterizarla, dependen de la representación de los siguientes elementos que conforman el proceso:

- La distribución de llegadas. Pueden ser expresadas en términos de tasas de flujo (vehículos/hora) o intervalos de tiempo (segundos/vehículo).
- La capacidad de servicio o característica de salida.
- El método de servicio, es decir, si se considera el primero en llegar es el primero en recibir el servicio, aleatoriamente, prioritariamente, etc.;

- La característica de la longitud de la cola, es decir si es finita o infinita.
- La distribución de los tiempos de servicio.
- El diseño del canal o carril de servicio, es decir si es único o múltiple, y en el caso de múltiples canales si éstos están en serie o en paralelo.

Existen dos clases básicas de tiempo entre llegadas:

Determinístico, en el cual clientes sucesivos llegan en un mismo intervalo de tiempo, fijo y conocido. Un ejemplo clásico es el de una línea de ensamble, en donde los artículos llegan a una estación en intervalos invariables de tiempo (conocido como ciclos de tiempo)

Probabilístico, en el cual el tiempo entre llegadas sucesivas es incierto y variable.

Los tiempos entre llegadas probabilísticos se describen mediante una distribución de probabilidad.

En el caso probabilístico, la determinación de la distribución real, a menudo, resulta difícil, sin embargo la distribución exponencial ha mostrado ser confiable en muchos de los problemas prácticos.

La función de densidad, para una distribución exponencial, depende del promedio de llegadas por unidad de tiempo la cual representamos con la letra griega lambda.

$$f(t) = (1/\lambda)e^{-\lambda t}$$

Con una cantidad, t de tiempo, se puede hacer uso de la función de densidad para calcular la probabilidad de que el siguiente cliente llegue dentro de la siguiente t unidades a partir de la llegada anterior, de la manera siguiente:

$$P(\text{tiempo entre llegadas} \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Las colas también pueden clasificarse por el método que usan para servir los arribos o elementos que llegan.

En el caso de las estaciones de recaudo aplica la norma “el primero en llegar, es el primero en recibir el servicio”, donde se sirven a las unidades en el orden en que éstas arriban.

## CARACTERÍSTICAS DE LA LONGITUD DE LA COLA

La longitud máxima de la cola, esto es el máximo número de unidades en la cola, se especifica en cada caso si la cola es finita o trunca o si no hay restricción en la longitud de

la cola. Las colas finitas son algunas veces necesarias cuando el área de espera es limitada.

En el caso de las estaciones de recaudo de peaje se consideran las colas finitas, establecido contractualmente de que no haya colas superiores a 5 camiones o 10 autos.

## DISTRIBUCIÓN DEL SERVICIO

Esta distribución es también considerada usualmente como aleatoria, y las distribuciones de Poisson y Exponencial Negativa son las más representativas y usuales para describir el comportamiento del servicio.

Bajo tres condiciones, una distribución Poisson puede describir el proceso aleatorio.

Las tres condiciones necesarias para la existencia del proceso de llegada Poisson son:

Continuidad: Al menos un cliente debe llegar a la cola durante un intervalo de tiempo.

Estacionario: Para un intervalo de tiempo dado, la probabilidad de que llegue un cliente es la misma que para todos los intervalos de tiempo de la misma longitud.

Independencia: La llegada de un cliente no tiene influencia sobre la llegada de otro.

Estas condiciones no restringen el problema y son satisfechas en muchas situaciones.

Distribución de Llegada Poisson

$$P(X = k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$$

Dónde:

$\lambda$  = esperanza de llegada de un cliente por unidad de tiempo

t = intervalo de tiempo.

e = 2.7182818 (base del logaritmo natural).

$k! = k (k - 1) (k - 2) (k - 3) \dots (3)(2)(1)$

La anterior es una distribución discreta empleada con mucha frecuencia para describir el patrón de las llegadas a un sistema de colas, donde para tasas medias de llegada pequeña es asimétrica; y se hace más simétrica y se aproxima a la binomial para tasas de llegadas altas.

## NÚMERO DE CANALES

El número de carriles usualmente corresponde al número de líneas de espera, lo que es utilizado también para clasificar las colas.

Tenemos los siguientes tipos de colas:



Figura 6. Sistema de una cola y un servidor. Fuente: Elaboración propia

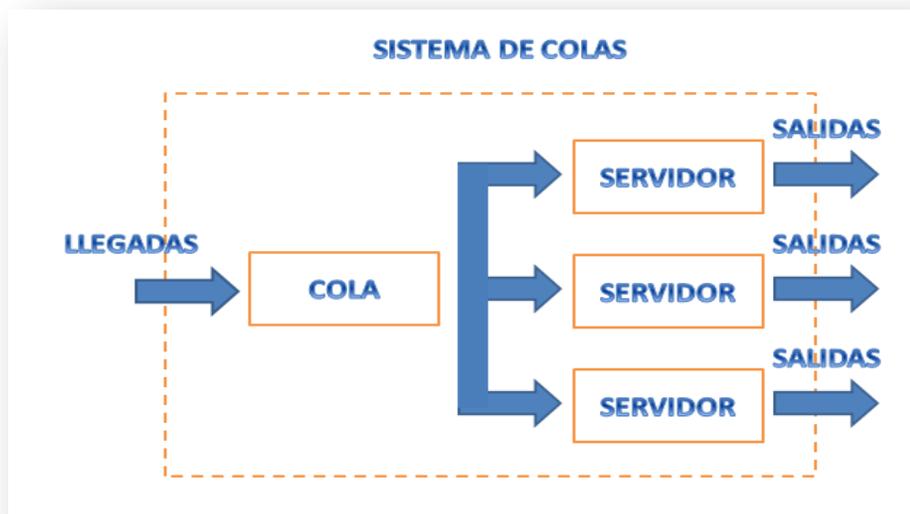


Figura 7. Sistema una cola y múltiples servidores. Fuente: Elaboración propia

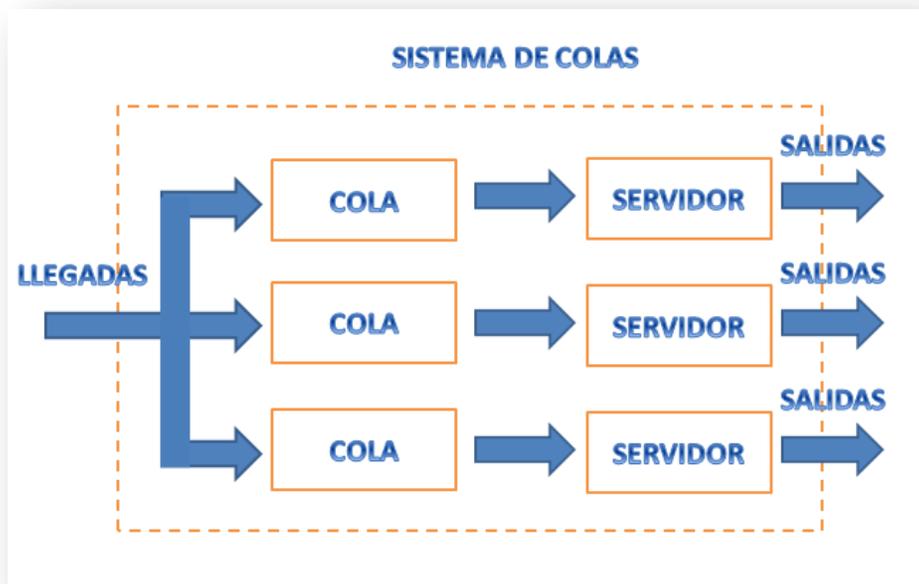


Figura 8. Sistema múltiples colas y múltiples servidores Fuente: Elaboración propia

### COLAS SOBRESATURADAS Y NO SATURADAS

Las colas sobresaturadas son aquellas en las cuales la tasa de arribo es mayor que la tasa de servicio y las colas no saturadas son aquellas en las cuales la tasa de arribo es menor que la tasa de servicio. La longitud de la cola no saturada podría variar pero alcanzará un estado estable con el arribo de unidades. La longitud de una cola sobresaturada, sin embargo nunca alcanzará un estado estable, y continuará creciendo con el arribo de las unidades.

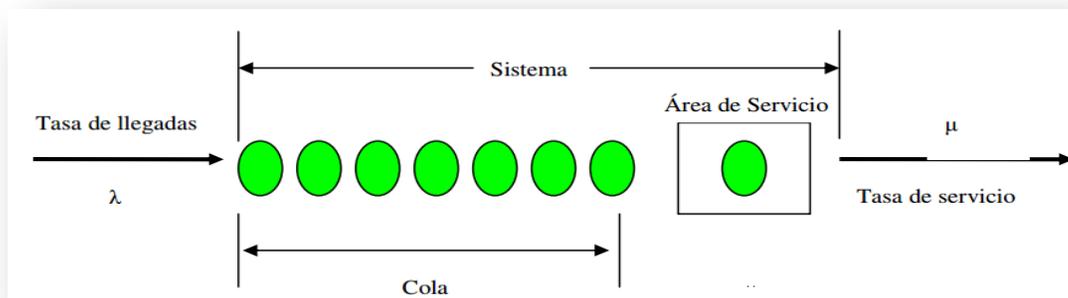


Figura 9. Esquema de una sola cola de canal único. Fuente: Universidad de Piura

La ilustración 9 es un esquema de una sola cola de canal único en el cual la tasa de arribo es vph (vehículos por hora) y la tasa de servicio es vph.

Para una cola no saturada, asumiendo que para ambas, la tasa de llegadas y la tasa de servicio, son aleatorias, se presentan en el capítulo 7 las diferentes relaciones que para el caso de las estaciones de recaudo de peaje nos interesan aplicar.

## Capítulo 5

### Diseño Metodológico

Para realizar el estudio que permita dimensionar el número de carriles con que debe contar una estación de recaudo de peaje para que su infraestructura sea suficiente para atender la demanda de vehículos que habrá para un periodo de tiempo determinado, es necesario determinar cuál es el tiempo de atención para cada tipo de vehículo.

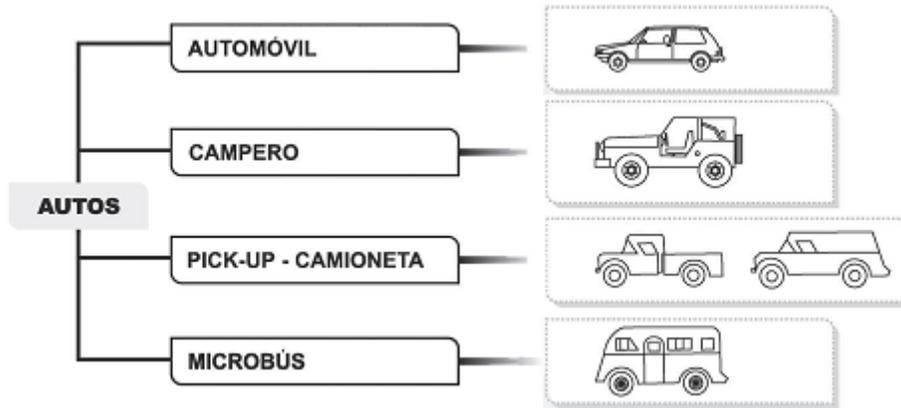
Para esto se seleccionan 5 estaciones de recaudo que se encuentren en diversas regiones de Colombia, con actividades socioeconómicas diferentes, de manera que esto se refleje en una heterogeneidad en la composición vehicular, también las estaciones de recaudo deben presentar diferentes sistemas de recaudo, como son las estaciones de recaudo que cuenten con sistemas de control de recaudo automatizados y estaciones de recaudo de peaje con boletería manual.

Una vez seleccionadas las estaciones de recaudo de peajes se dispondrán cámaras de video en cada uno de los sentidos de los peajes para realizar aforos sobre video las 24 horas del día por una semana, e identificar el día y hora de la semana que presentó el mayor volumen de vehículos.

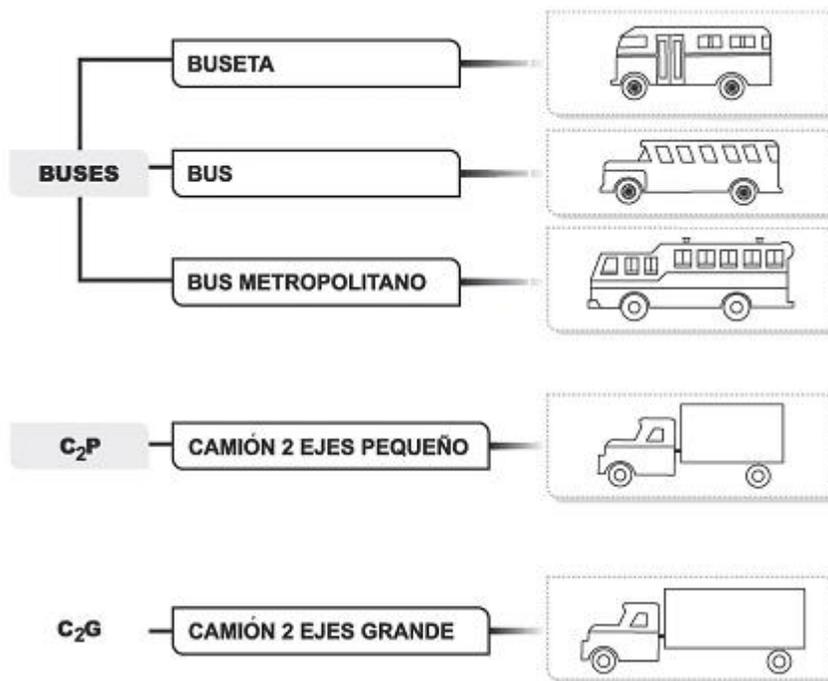
Teniendo identificada la hora de mayor volumen de vehículos en cada una de las estaciones de recaudo de peaje, se realizan aforos en periodos de 15 minutos, iniciando 45 minutos antes de la hora de mayor volumen observado hasta 45 minutos después de la hora en que se observó la hora con el mayor volumen. A partir de los aforos en periodos de 15 minutos se identifica la Hora de Máxima Demanda durante el periodo del estudio, tomando esta hora como periodo de estudio para cada peaje en particular.

Con el fin de obtener un valor promedio de los tiempos de atención de los vehículos servidos por el sistema de recaudo, se toman tiempos por pelotones, es decir agrupaciones de vehículos mixtos que tardan un periodo de tiempo desde el ingreso del primer vehículo hasta que es servido el último vehículo de la agrupación, catalogando cada uno de los vehículos de acuerdo a las categorías establecidas por el INVIAS como se indican a continuación:

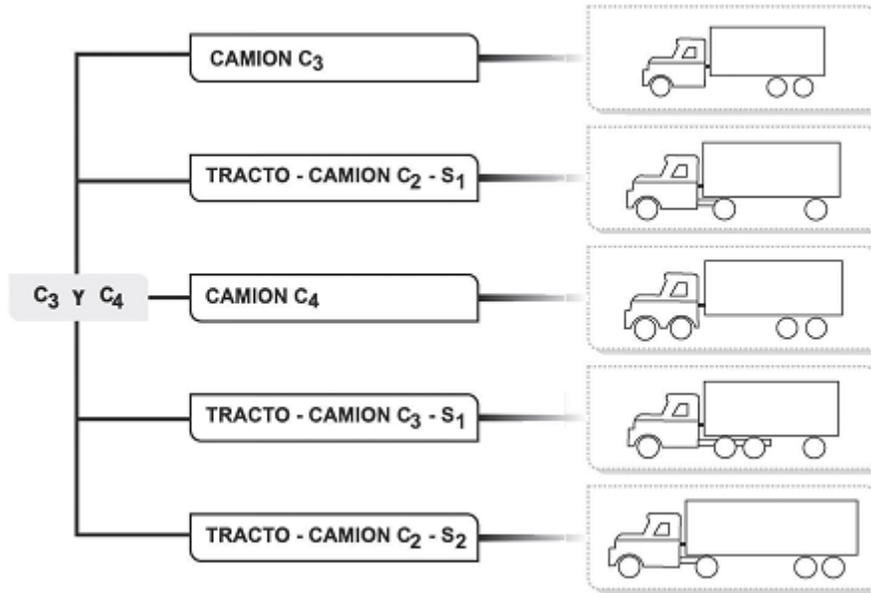
CATEGORÍA 1 AUTOMÓVILES



CATEGORÍA 2 BUSES Y CAMIONES DE DOS EJES



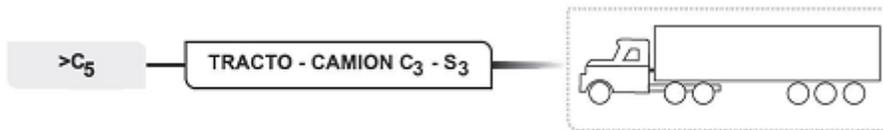
C3 CAMIONES RÍGIDOS O ARTICULADOS DE TRES EJES O CUATRO EJES



C4 CAMIONES ARTICULADOS DE CINCO EJES



C5 CAMIONES ARTICULADOS DE CINCO EJES O MÁS



Una vez se han establecido los tiempos de atención por pelotones de vehículos, se determina para cada estación de recaudo de peaje las tasas de servicio observadas y se emplea poisson para evaluar cada uno de los siguientes parámetros, los cuales nos permiten realizar un diagnóstico del funcionamiento de las estaciones de recaudo en estudio:

- Tiempo promedio de atención vehículos mixtos
- Tasa de arribo ( $\lambda$ )
- Tasa de servicio ( $\mu$ )
- Relación Tasa de Arribo vs Tasa de Servicio ( $\rho$ )

$$\rho = \lambda / \mu$$

- Longitud promedio de la cola en el sistema

$$E(m) = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

- Probabilidad de que haya más de N vehículos por carril en el sistema, para esto se emplea la siguiente ecuación

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1}$$

La evaluación se hace para 5 vehículos en el caso de que los 5 vehículos sean camiones y 10 para el caso en el que los vehículos sean autos. Al emplear las ecuaciones de poisson no diferencian los autos de buses o camiones, de manera que no se tienen en cuenta la composición vehicular al estimar las probabilidades de las colas en el sistema.

- Número de unidades esperadas en el sistema. Se emplea la siguiente ecuación para colas finitas.

$$E(n) = \frac{\rho}{1 - \rho} * \frac{1 - (N + 1)\rho^N + N\rho^{N+1}}{1 - \rho^{N+1}}$$

- Tiempo promedio de espera en cola

$$E(w) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

- Porcentaje de tiempo en que la rampa está llena

$$P(n) = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+1}} * \rho^n$$

- Probabilidad de gastar 60 segundos o menos en el sistema. Se toman 60 segundos teniendo en cuenta que en el contrato de recaudo de peajes de INVIAS está estipulado que se deben atender 300 veh/hora/carril, es decir 12 seg/veh/carril, para una cola de 5 vehículos se deben atender en 60 segundos.

$$P(v \leq t) = 1 - e^{-\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t}$$

Se determinarán los tiempos de atención por categoría y se propondrá una fórmula para establecer el número de carriles con los que debe contar una estación de recaudo de peaje para atender la demanda teniendo como base el tráfico actual, estimando un crecimiento del tráfico para un tiempo establecido de servicio.

#### Definición de Hipótesis

- ✓ Las pérdidas de tiempo en cabina o ajenas al sistema están consideradas al hacer el análisis por pelotones.
- ✓ La tasa de servicio del peaje sobre la vía en estudio depende del tráfico y de la composición vehicular, ya que una vía con mayor número de vehículos de carga tendrá una menor tasa de servicio que una vía con el mismo tráfico pero cuya composición vehicular sea predominantemente de autos, ya que los vehículos de carga son más lentos para arrancar y de mayor longitud, de manera que requieren un mayor tiempo de despeje que un vehículo más pequeño y liviano.

## Capítulo 6

### Resultados y discusión

#### 6.1. Estación de recaudo de Peaje Tarapacá II

La estación de recaudo de peaje de Tarapacá II se encuentra en el departamento de Risaralda, hace parte de la Concesión Vial Autopistas del Café.

Se encuentra sobre la vía El Jazmín – Chinchiná en el PR24+100, la cual hace parte de la Variante Troncal de Occidente, correspondiente a la Ruta 29RSC,.

En esta estación de recaudo de Peaje tiene cobro en ambos sentidos. Cuenta con 4 carriles para el recaudo del peaje.

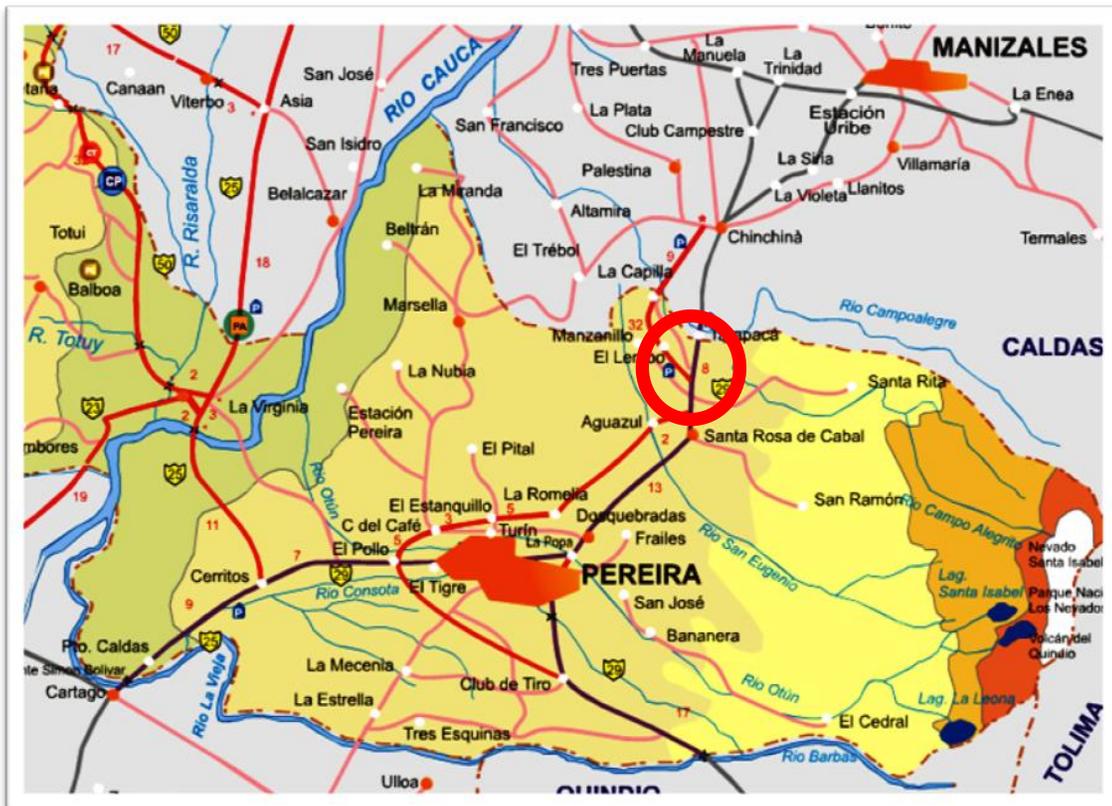


Figura 10. Ubicación estación de recaudo Tarapacá II. Fuente: [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co)

Durante la semana del 19 al 25 de mayo de 2013 se observó un TPD<sub>s</sub> de 5627 vehículos.



Figura 11. Estación de recaudo de peaje Tarapacá II. Fuente: [www.autopistasdelcafe.com](http://www.autopistasdelcafe.com)

### **6.1.1. Determinación Hora de máxima demanda semanal**

Para el estudio de esta estación de recaudo de peaje se empleó la semana comprendida entre el 19 y el 25 de mayo de 2013.

Apoyados en el reporte hora a hora del sistema empleado para establecer el recaudo, se observó que la hora de máximo tráfico de la semana en estudio corresponde al día viernes 24 de mayo de 2013, entre las 17 y las 18 horas, con 468 vehículos.

Con el fin de determinar la hora de máxima demanda se realizaron aforos de 15 minutos sobre video entre las 16:15 hasta las 18:45, obteniendo que la hora de máxima demanda se identificó entre las 17:30 y las 18:30 del 24 de mayo de 2013 con un total de 477 vehículos. Se obtuvo un factor de hora pico de FHP=0.88.

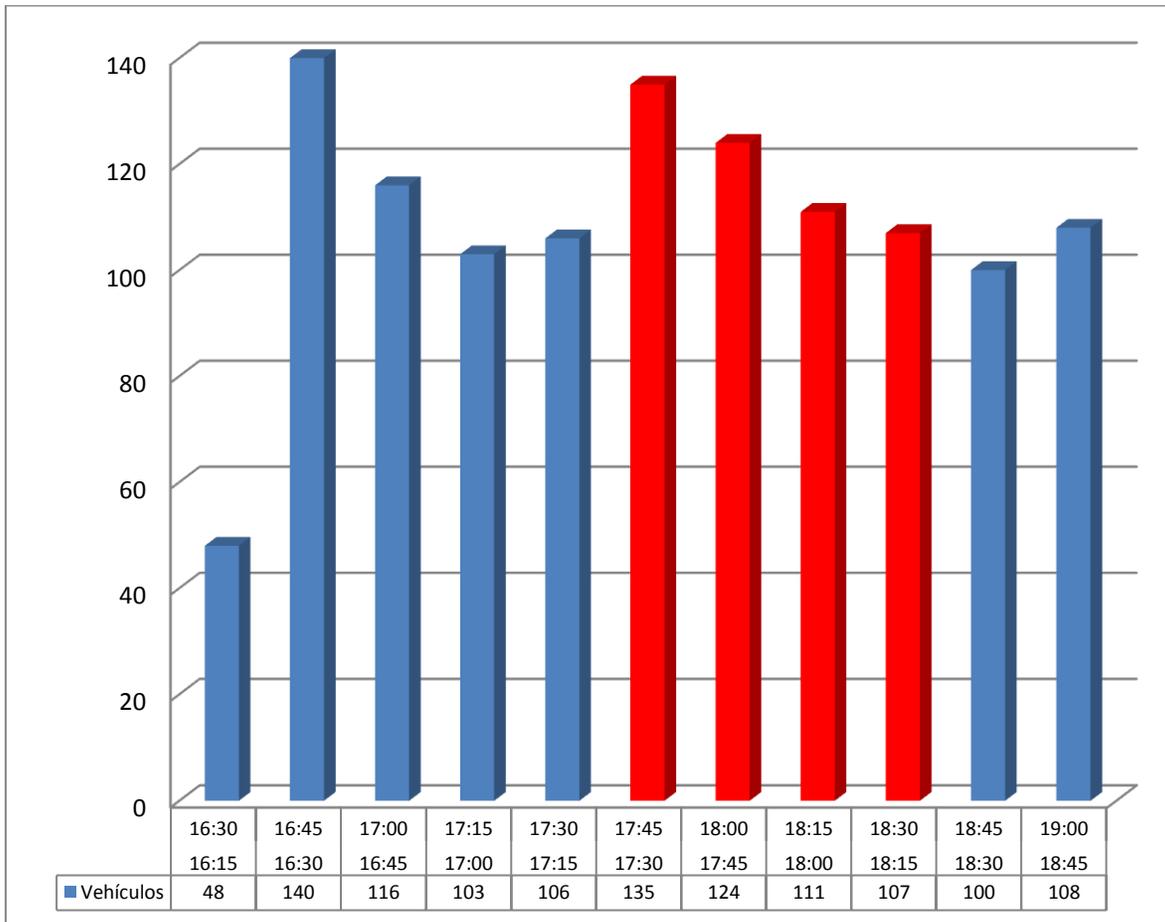


Figura 12. Tarapacá II - Aforo para determinar hora de máxima demanda  
Fuente: Elaboración propia

### 6.1.2. Tiempos de atención en el sistema

En la hora de máxima demanda se midieron los tiempos de los pelotones de vehículos identificados en el video, desde la llegada del primer vehículo hasta la salida del último, para obtener unos tiempos medios de atención efectiva en el sistema, en diferentes composiciones vehiculares, para poder establecer el tiempo medio para cada una de las categorías, obteniéndose los siguientes resultados:

En promedio es atendido 1 vehículo cada 18 segundos

Los tiempos de atención por cada una de las categorías observadas fueron:

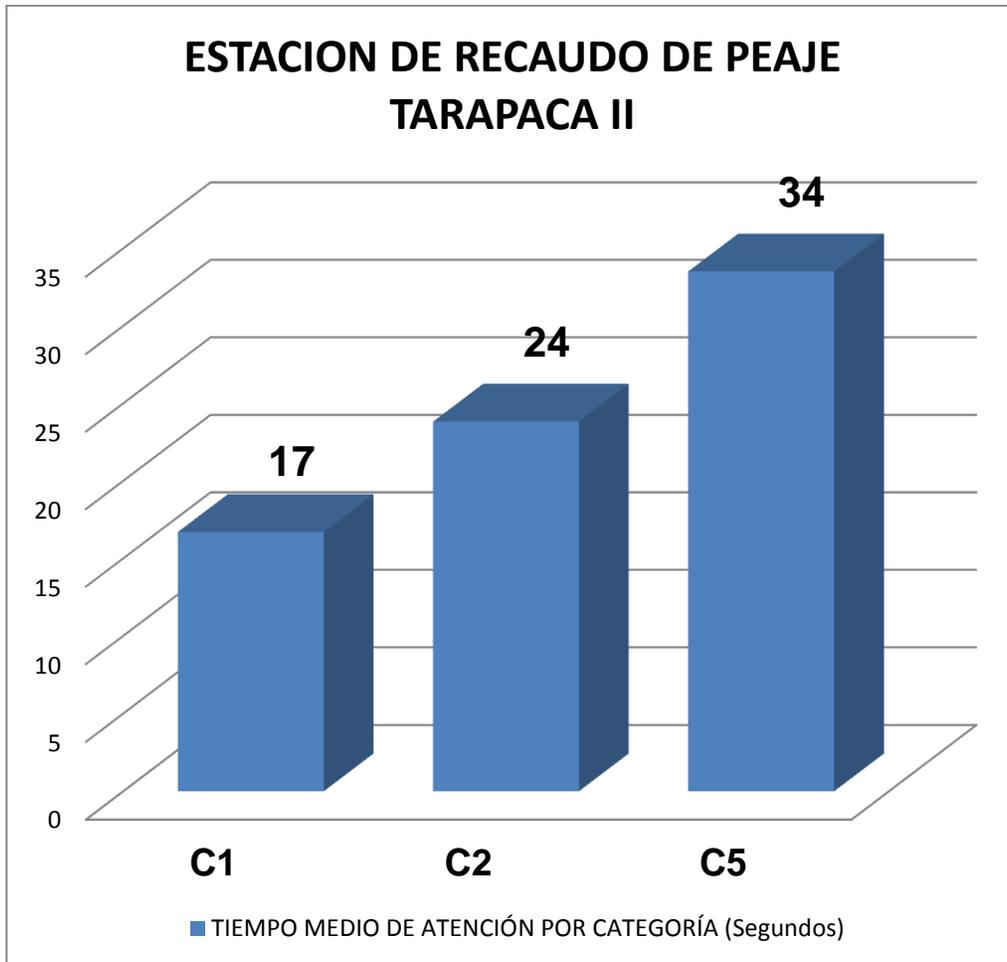


Figura 13. Tiempos de atención por categoría Peaje Tarapacá II  
Fuente: Elaboración propia

Categoría 1 : 17 segundos / vehículo

Categoría 2 : 24 segundos / vehículo

Categoría 5 : 34 segundos / vehículo

No se observaron durante el periodo en estudio vehículos de categorías 3 y 4

### 6.1.3. Indicadores operativos

Para el análisis de esta estación de recaudo de peaje, y de acuerdo a lo observado durante la hora de máxima demanda se obtuvieron los siguientes parámetros promedio por carril:

Tabla 1. Parámetros estación de recaudo de peaje Tarapacá II

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de arribo	$\lambda =$	120 vph
Tasa de servicio	$\mu =$	200 vph
Relación tasas de arribo y servicio	$\rho = \lambda / \mu =$	0.60

Fuente: Elaboración propia

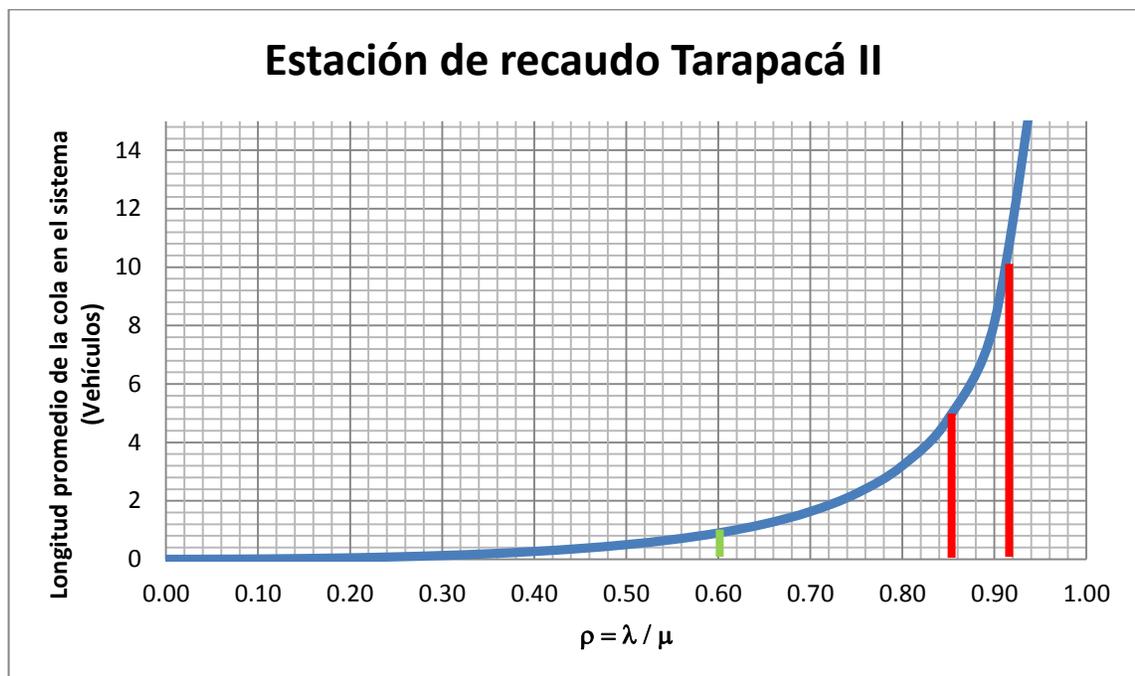


Figura 14. Tarapacá II Gráfico  $\rho$  vs Longitud promedio cola en el sistema.  
Fuente: Elaboración propia

**6.1.3.1. La longitud promedio de la cola en el sistema es de:**

$$E(m) = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = 1 \text{ veh\u00edculos}$$

Teniendo en cuenta que la relaci\u00f3n entre tasa de arribo vs tasa de servicio para una cola de 5 veh\u00edculos es de 0.86 y para 10 veh\u00edculos es de 0.92, para las evaluaciones se tomar\u00e1 una cola m\u00e1xima de 5 veh\u00edculos, siendo esta la m\u00e1s cr\u00edtica para cumplir con las obligaciones contractuales.

**6.1.3.2. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 5 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 5 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 5 \%$$

**6.1.3.3. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 10 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 10 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 0 \%$$

**6.1.3.4. N\u00famero de unidades esperadas en el sistema**

Para determinar el n\u00famero de unidades esperadas en el sistema, podemos determinarlo mediante dos escenarios.

El primer escenario es considerando colas infinitas, no saturadas, de carril \u00fanico:

$$E(n) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = 2 \text{ veh\u00edculos}$$

El segundo escenario es si consideramos que la cola es finita, no saturada, de carril único. Para este caso la capacidad máxima de la cola es de  $N = 5$  vehículos.

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} * \frac{1-(N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}}{1-\rho^{N+1}} = 2 \text{ veh\u00edculos}$$

#### 6.1.3.5. Tiempo promedio de espera en cola

$$E(w) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = 27 \text{ segundos}$$

#### 6.1.3.6. Porcentaje de tiempo en que la rampa est\u00e1 llena

$$P(n) = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} * \rho^n = 3 \%$$

#### 6.1.3.7. Probabilidad de gastar 60 seg o menos en el sistema

$$P(v \leq t) = 1 - e^{-\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} = 100 \%$$

### 6.1.4. Diagn\u00f3stico de la situaci\u00f3n actual

En la actualidad la estaci\u00f3n de peaje de recaudo de Tarapac\u00e1 atiende el 60% de la tasa de servicio observada, con tiempo de espera de 27 segundos en promedio para ser atendidos y dos veh\u00edculos en el sistema por carril.

Estimando que el crecimiento del parque automotor sea similar al crecimiento de la econom\u00eda para el periodo 2009-2013, el cual corresponde a 4.2%<sup>1</sup>, se esperar\u00eda que en 8.5 a\u00f1os se presenten colas de 5 veh\u00edculos cuando la tasa de arribo por carril sea de 170 veh\u00edculos/hora/carril, con tiempo de espera de 1 minuto y 42 segundos.

---

<sup>1</sup> Banco Mundial, <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

De igual manera se espera que en 10.3 años se presenten colas de 10 vehículos con una tasa de arribo de 183 vehículos/hora/carril con tiempo de espera de 3 minutos y 14 segundos.

En el momento la capacidad de la estación de recaudo es suficiente para atender la demanda actual.





Figura 16. Estación de recaudo de peaje Santágueda.  
Fuente: [www.autopistasdelcafe.com](http://www.autopistasdelcafe.com)

### **6.2.1. Determinación hora de máxima demanda semanal**

Para el estudio de esta estación de recaudo de peaje se empleó la semana comprendida entre el 15 y el 21 de septiembre de 2013.

Apoyados en el reporte hora a hora del sistema empleado para establecer el recaudo, se observó que la hora de máximo tráfico de la semana en estudio corresponde al día martes 15 de septiembre de 2013, entre las 16 y las 17 horas, con 230 vehículos.

Con el fin de determinar la hora de máxima demanda se realizaron aforos de 15 minutos sobre video entre las 15:15 hasta las 17:45, obteniendo que la hora de máxima demanda se identificó entre las 16:30 y las 17:30 del 15 de septiembre de 2013 con un total de 234 vehículos. Se obtuvo un factor de hora pico de  $FHP=0.90$ .

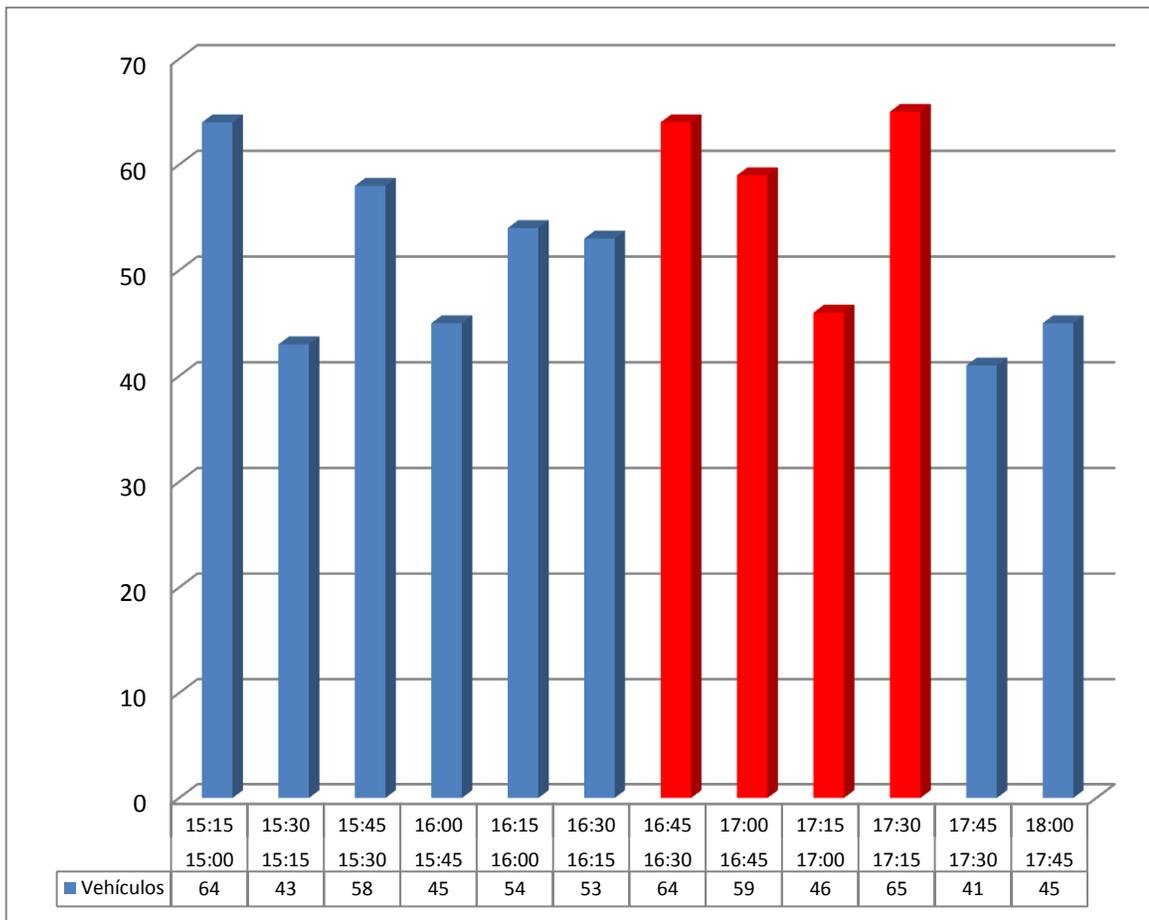


Figura 17. Santágueda - Aforo para determinar hora de máxima demanda  
Fuente: Elaboración propia

### 6.2.2. Tiempos de atención en el sistema

En la hora de máxima demanda se midieron los tiempos de los pelotones de vehículos identificados en el video, desde la llegada del primer vehículo hasta la salida del último, para obtener unos tiempos medios de atención efectiva en el sistema, en diferentes composiciones vehiculares, para poder establecer el tiempo medio para cada una de las categorías, obteniéndose los siguientes resultados:

En promedio es atendido 1 vehículo cada 20 segundos

Los tiempos de atención por cada una de las categorías observadas fueron:

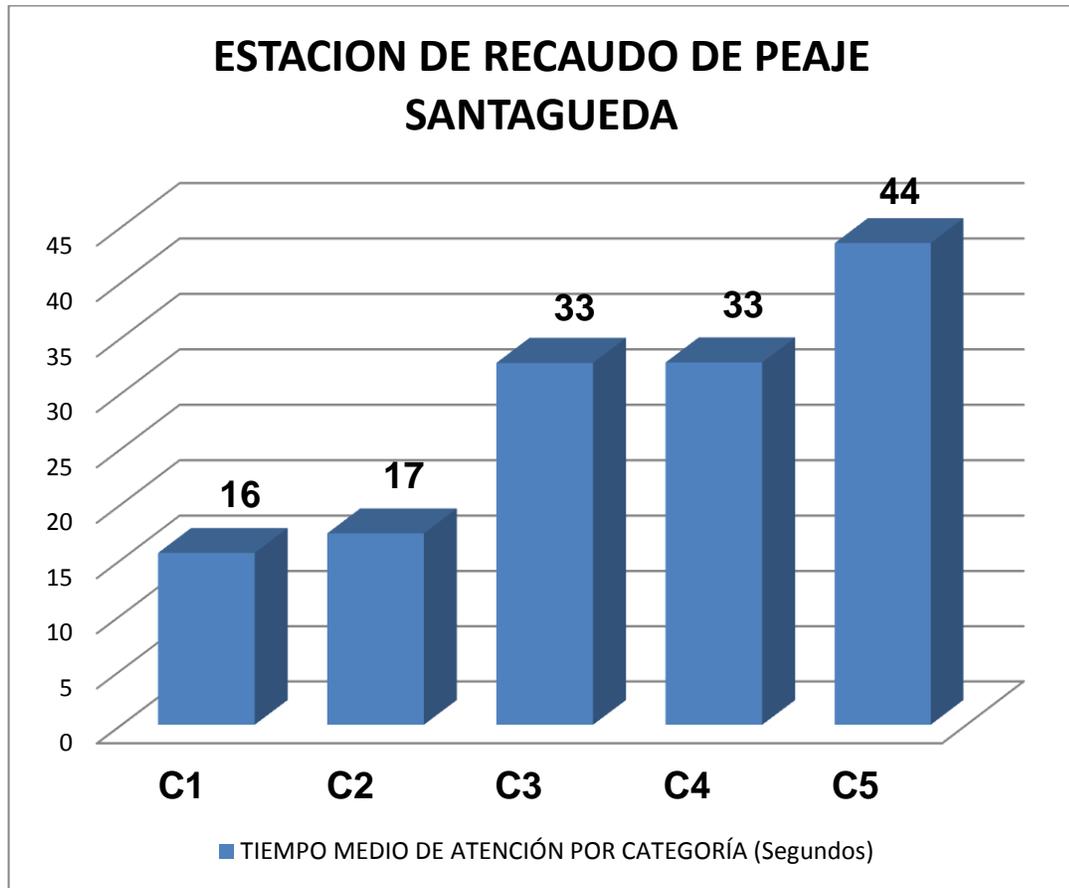


Figura 18. Tiempos de atención por categoría Peaje Santágueda  
Fuente: Elaboración propia

- Categoría 1 : 16 segundos / vehículo
- Categoría 2 : 17 segundos / vehículo
- Categoría 3 : 33 segundos / vehículo
- Categoría 4 : 33 segundos / vehículo
- Categoría 5 : 44 segundos / vehículo

### 6.2.3. Indicadores operativos

Para el análisis de esta estación de recaudo de peaje, y de acuerdo a lo observado durante la hora de máxima demanda se obtuvieron los siguientes parámetros promedio por carril:

Tabla 2. Parámetros estación de recaudo de peaje Santágueda

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de arribo	$\lambda =$	78 vph
Tasa de servicio	$\mu =$	177 vph
Relación tasas de arribo y servicio	$\rho = \lambda / \mu =$	0.44

Fuente: Elaboración propia

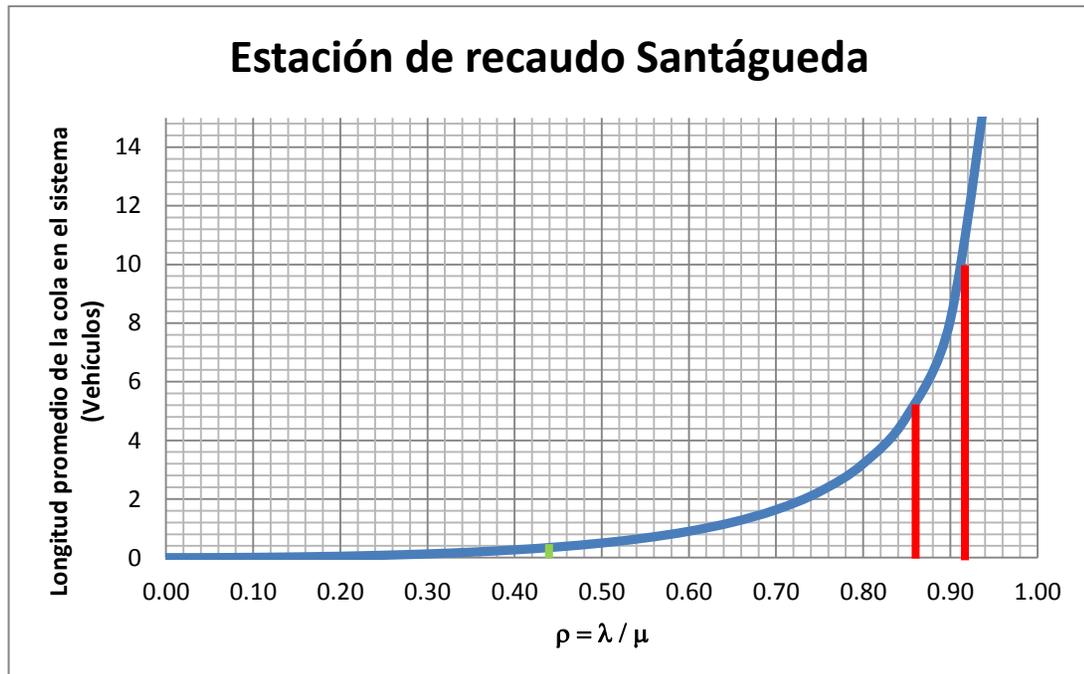


Figura 19. Santágueda - Gráfico  $\rho$  vs Longitud promedio cola en el sistema  
Fuente: Elaboración propia

**6.2.3.1. La longitud promedio de la cola en el sistema es de:**

$$E(m) = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = 1 \text{ veh\u00edculo}$$

Teniendo en cuenta que la relaci\u00f3n entre tasa de arribo vs tasa de servicio para una cola de 5 veh\u00edculos es de 0.86 y para 10 veh\u00edculos es de 0.92, para las evaluaciones se tomar\u00e1 una cola m\u00e1xima de 5 veh\u00edculos, siendo esta la m\u00e1s cr\u00edtica para cumplir con las obligaciones contractuales.

**6.2.3.2. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 5 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 5 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 1 \%$$

**6.2.3.3. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 10 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 10 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 0 \%$$

**6.2.3.4. N\u00famero de unidades esperadas en el sistema**

Para determinar el n\u00famero de unidades esperadas en el sistema, podemos determinarlo mediante dos escenarios.

El primer escenario es considerando colas infinitas, no saturadas, de carril \u00fanico:

$$E(n) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = 1 \text{ veh\u00edculo}$$

El segundo escenario es si consideramos que la cola es finita, no saturada, de carril \u00fanico. Para este caso la capacidad m\u00e1xima de la cola es de  $N = 5$  veh\u00edculos.

$$E(n) = \frac{\rho}{1 - \rho} * \frac{1 - (N + 1)\rho^N + N\rho^{N+1}}{1 - \rho^{N+1}} = 1 \text{ veh\u00edculo}$$

#### 6.2.3.5. Tiempo promedio de espera en cola

$$E(w) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = 17 \text{ segundos}$$

#### 6.2.3.6. Porcentaje de tiempo en que la rampa est\u00e1 llena

$$P(n) = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+1}} * \rho^n = 1 \%$$

#### 6.2.3.7. Probabilidad de gastar 60 seg o menos en el sistema

$$P(v \leq t) = 1 - e^{-\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} = 100 \%$$

### 6.2.4. Diagn\u00f3stico de la situaci\u00f3n actual

En la actualidad la estaci\u00f3n de peaje de recaudo de Sant\u00e1gueda atiende el 44% de la tasa de servicio observada, con tiempo de espera de 17 segundos en promedio para ser atendidos y un veh\u00edculo en el sistema por carril.

Estimando que el crecimiento del parque automotor sea similar al crecimiento de la economía para el periodo 2009-2013, el cual corresponde a 4.2%<sup>2</sup>, se esperaría que en 16.1 años se presenten colas de 5 vehículos cuando la tasa de arribo por carril sea de 151 vehículos/hora/carril, con tiempo de espera de 1 minuto y 49 segundos.

De igual manera se espera que en 17.8 años se presenten colas de 10 vehículos con una tasa de arribo de 162 vehículos/hora/carril con tiempo de espera de 3 minutos y 40 segundos.

En el momento la capacidad de la estación de recaudo es suficiente para atender la demanda actual.

---

<sup>2</sup> Banco Mundial, <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

### 6.3. Estación de recaudo de Peaje Vanguardia

La estación de recaudo de peaje de Vanguardia se encontraba ubicada en el departamento del Meta, antes del Aeropuerto de Vanguardia, que presta sus servicios a Villavicencio. Hoy día este peaje fue desmontado y reemplazado por el Puesto de Control de Puente Amarillo. En el momento de hacer la evaluación estaba a cargo de la Concesión de Autopistas de los Llanos.

Se encontraba sobre la vía Villavicencio – Barranca de Upia la cual hace parte de la Vía Villavicencio - Yopal, correspondiente a la Ruta 65.

En esta estación de recaudo de Peaje tenía cobro en ambos sentidos. Contaba con 4 carriles para el recaudo del peaje.



Figura 20. Ubicación estación de recaudo Vanguardia Fuente: [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co)

Durante la semana del 19 al 25 de mayo de 2013 se observó un TPD<sub>s</sub> de 6178 vehículos.



Figura 21. Estación de recaudo de peaje Vanguardia. Fuente: [www.allanos.com.co](http://www.allanos.com.co)

### **6.3.1. Determinación hora de máxima demanda semanal**

Para el estudio de esta estación de recaudo de peaje se empleó la semana comprendida entre el 19 y el 25 de mayo de 2013.

Apoyados en el reporte hora a hora del sistema empleado para establecer el recaudo, se observó que la hora de máximo tráfico de la semana en estudio corresponde al día viernes 24 de mayo de 2013, entre las 7 y las 8 horas, con 721 vehículos.

Con el fin de determinar la hora de máxima demanda se realizaron aforos de 15 minutos sobre video entre las 6:15 hasta las 8:45, obteniendo que la hora de máxima demanda se identificó entre las 17:15 y las 18:15 del 24 de mayo de 2013 con un total de 730 vehículos. Se obtuvo un factor de hora pico de  $FHP=0.83$ .

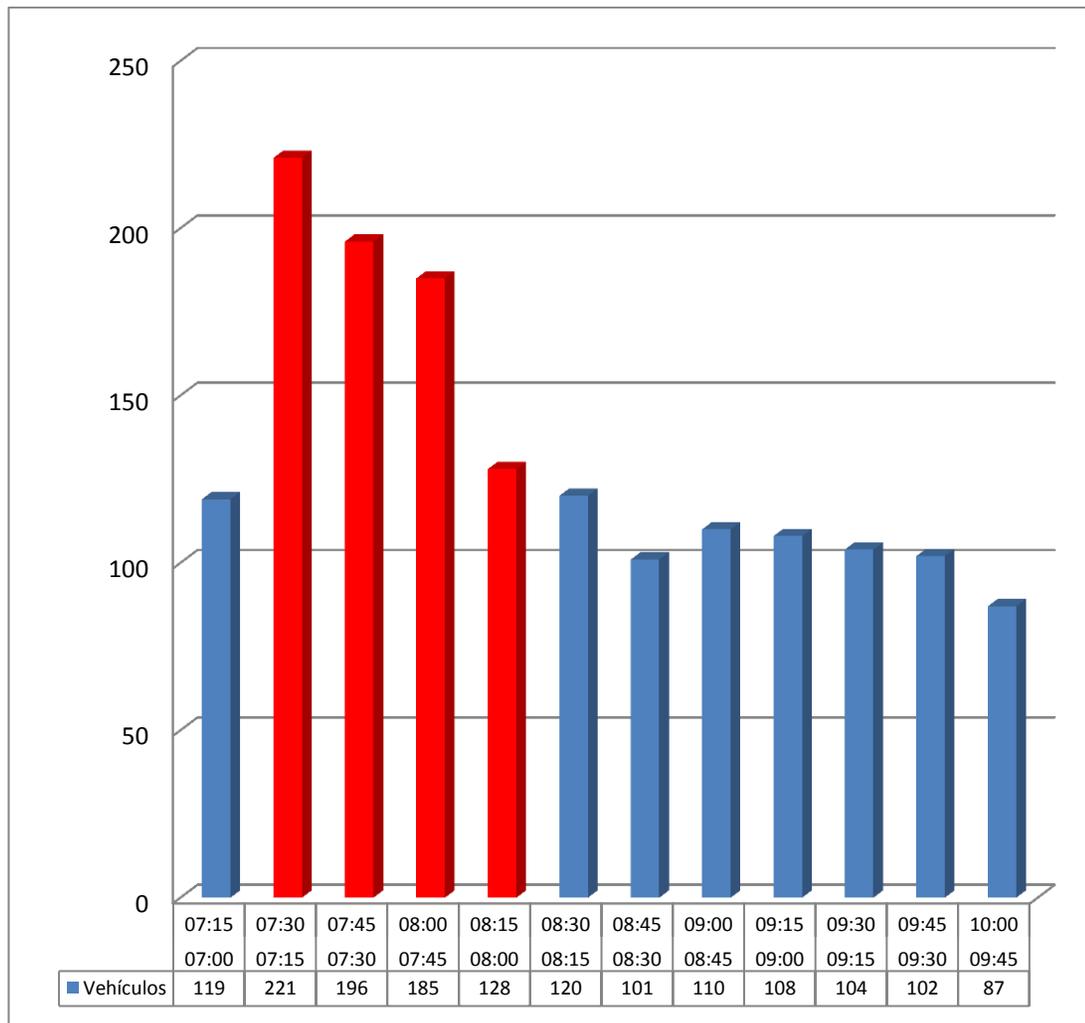


Figura 22. Vanguardia - Aforo para determinar hora de máxima demanda.  
Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2. Tiempos de atención en el sistema

En la hora de máxima demanda se midieron los tiempos de los pelotones de vehículos identificados en el video, desde la llegada del primer vehículo hasta la salida del último, para obtener unos tiempos medios de atención efectiva en el sistema, en diferentes composiciones vehiculares, para poder establecer el tiempo medio para cada una de las categorías, obteniéndose los siguientes resultados:

En promedio es atendido 1 vehículo cada 11 segundos

Los tiempos de atención por cada una de las categorías observadas fueron:

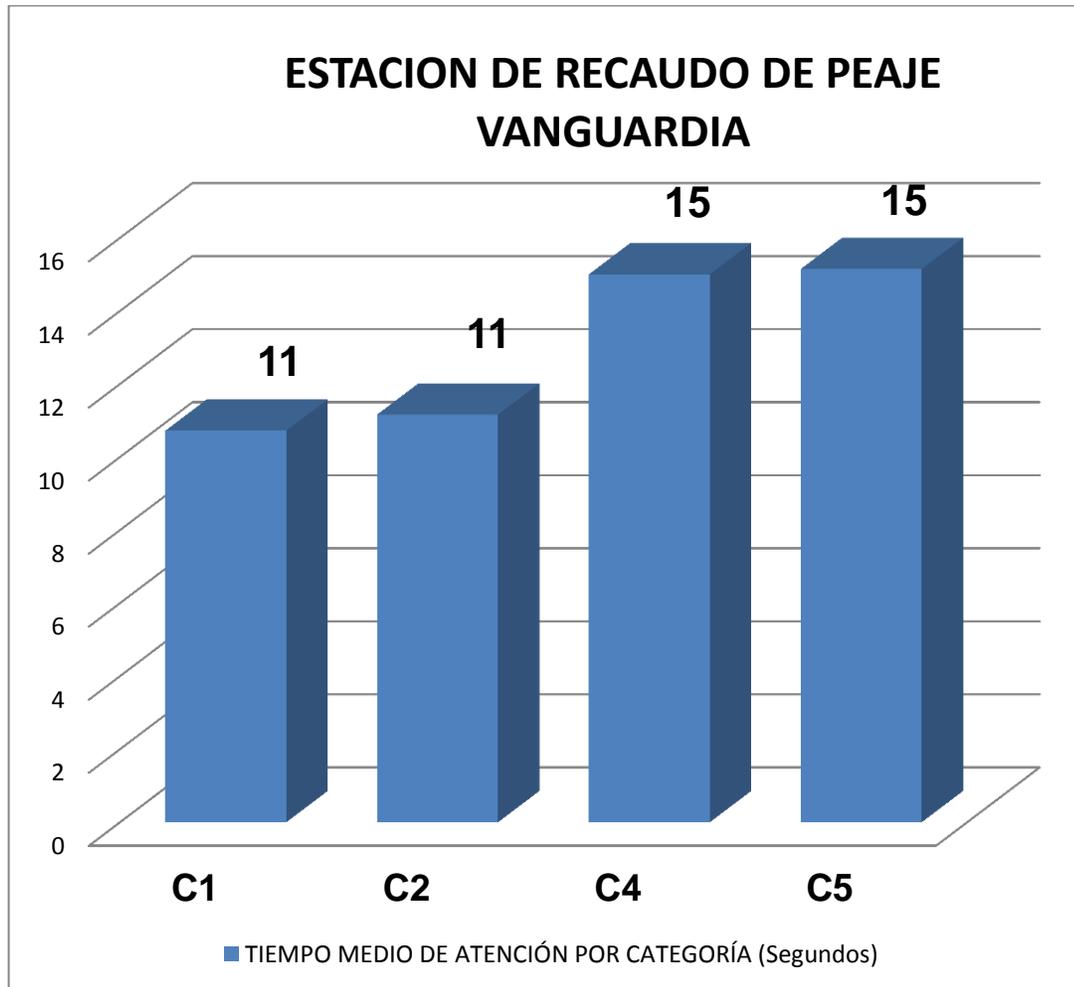


Figura 23. Tiempos de atención por categoría Peaje Vanguardia  
Fuente: Elaboración propia

Categoría 1 : 11 segundos / vehículo

Categoría 2 : 11 segundos / vehículo

Categoría 4 : 15 segundos / vehículo

Categoría 5 : 15 segundos / vehículo

No se observaron durante el periodo en estudio vehículos de categoría 3.

### 6.3.3. Indicadores operativos

Para el análisis de esta estación de recaudo de peaje, y de acuerdo a lo observado durante la hora de máxima demanda se obtuvieron los siguientes parámetros promedio por carril:

Tabla 3. Parámetros estación de recaudo de peaje Vanguardia

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de arribo	$\lambda =$	183 vph
Tasa de servicio	$\mu =$	327 vph
Relación tasas de arribo y servicio	$\rho = \lambda / \mu =$	0.56

Fuente: Elaboración propia

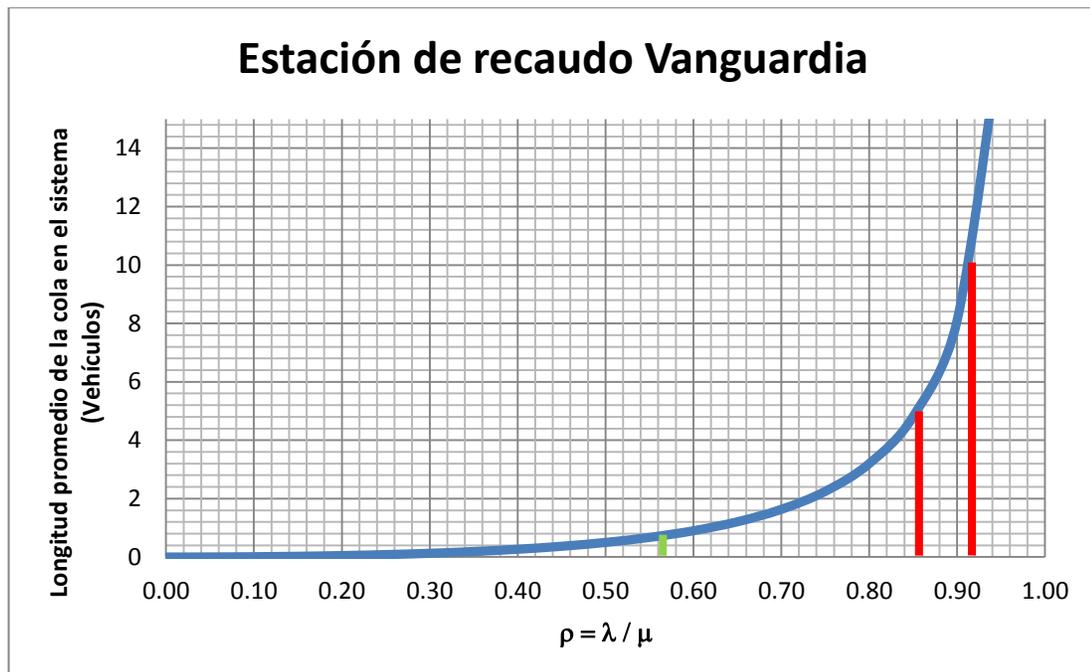


Figura 24. Vanguardia - Gráfico  $\rho$  vs Longitud promedio cola en el sistema

Fuente: Elaboración propia

**6.3.3.1. La longitud promedio de la cola en el sistema es de:**

$$E(m) = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = 1 \text{ veh\u00edculos}$$

Teniendo en cuenta que la relaci\u00f3n entre tasa de arribo vs tasa de servicio para una cola de 5 veh\u00edculos es de 0.86 y para 10 veh\u00edculos es de 0.92, para las evaluaciones se tomar\u00e1 una cola m\u00e1xima de 5 veh\u00edculos, siendo esta la m\u00e1s cr\u00edtica para cumplir con las obligaciones contractuales.

**6.3.3.2. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 5 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 5 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 3 \%$$

**6.3.3.3. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 10 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 10 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 0 \%$$

**6.3.3.4. N\u00famero de unidades esperadas en el sistema**

Para determinar el n\u00famero de unidades esperadas en el sistema, podemos determinarlo mediante dos escenarios.

El primer escenario es considerando colas infinitas, no saturadas, de carril \u00fanico:

$$E(n) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = 2 \text{ veh\u00edculos}$$

El segundo escenario es si consideramos que la cola es finita, no saturada, de carril único. Para este caso la capacidad máxima de la cola es de  $N = 5$  vehículos.

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} * \frac{1-(N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}}{1-\rho^{N+1}} = 2 \text{ vehiculos}$$

#### 6.3.3.5. Tiempo promedio de espera en cola

$$E(w) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = 14 \text{ segundos}$$

#### 6.3.3.6. Porcentaje de tiempo en que la rampa está llena

$$P(n) = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} * \rho^n = 2 \%$$

#### 6.3.3.7. Probabilidad de gastar 60 seg o menos en el sistema

$$P(v \leq t) = 1 - e^{-\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} = 100 \%$$

### 6.3.4. Diagnóstico de la situación actual

En el momento del estudio, la estación de peaje de recaudo de Vanguardia atiende el 56% de la tasa de servicio observada, con tiempo de espera de 14 segundos en promedio para ser atendidos y dos vehículos en el sistema por carril.

Estimando que el crecimiento del parque automotor sea similar al crecimiento de la economía para el periodo 2009-2013, el cual corresponde a 4.2%<sup>3</sup>, se esperaría que en 10.3 años se presenten colas de 5 vehículos cuando la tasa de arribo por carril sea de 279 vehículos/hora/carril, con tiempo de espera de 1 minuto y 4 segundos.

---

<sup>3</sup> Banco Mundial, <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

De igual manera se espera que en 12.0 años se presenten colas de 10 vehículos con una tasa de arribo de 299 vehículos/hora/carril con tiempo de espera de 1 minuto y 58 segundos.

En el momento del estudio la capacidad de la estación de recaudo es suficiente para atender la demanda actual, y los tiempos de atención se ajustan a los requerimientos operativos para recaudo de INVIAS para las estaciones de recaudo de peajes a su cargo.

Sin embargo por solicitudes de la comunidad, esta estación de recaudo de peaje fue desmontada y unificada con la estación de control de Puente Amarillo.

#### 6.4. Estación de recaudo de Peaje Los Curos

La estación de recaudo de peaje de Los Curos se encuentra en el departamento de Santander, en el momento de la evaluación esta estación de recaudo estaba a cargo del Instituto Nacional de Vías, bajo el Contrato de Concesión de Recaudo 250 de 2011, funcionando con boletería manual. Desde el mes de noviembre de 2013 la Agencia Nacional de Infraestructura adjudicó el corredor de Zipaquirá – El Palenque (Bucaramanga) al Consorcio Hidalgo e Hidalgo Colombia S.A.S.

Se encuentra sobre la vía San Gil - Bucaramanga en el PR53+950, de la Ruta 45A.

En esta estación de recaudo de Peaje tiene cobro en ambos sentidos. Cuenta con 2 carriles para el recaudo del peaje.



Figura 25. Ubicación estación de recaudo Los Curos  
Fuente: [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co)

Durante la semana del 19 al 25 de mayo de 2013 se observó un TPD<sub>s</sub> de 4054 vehículos.



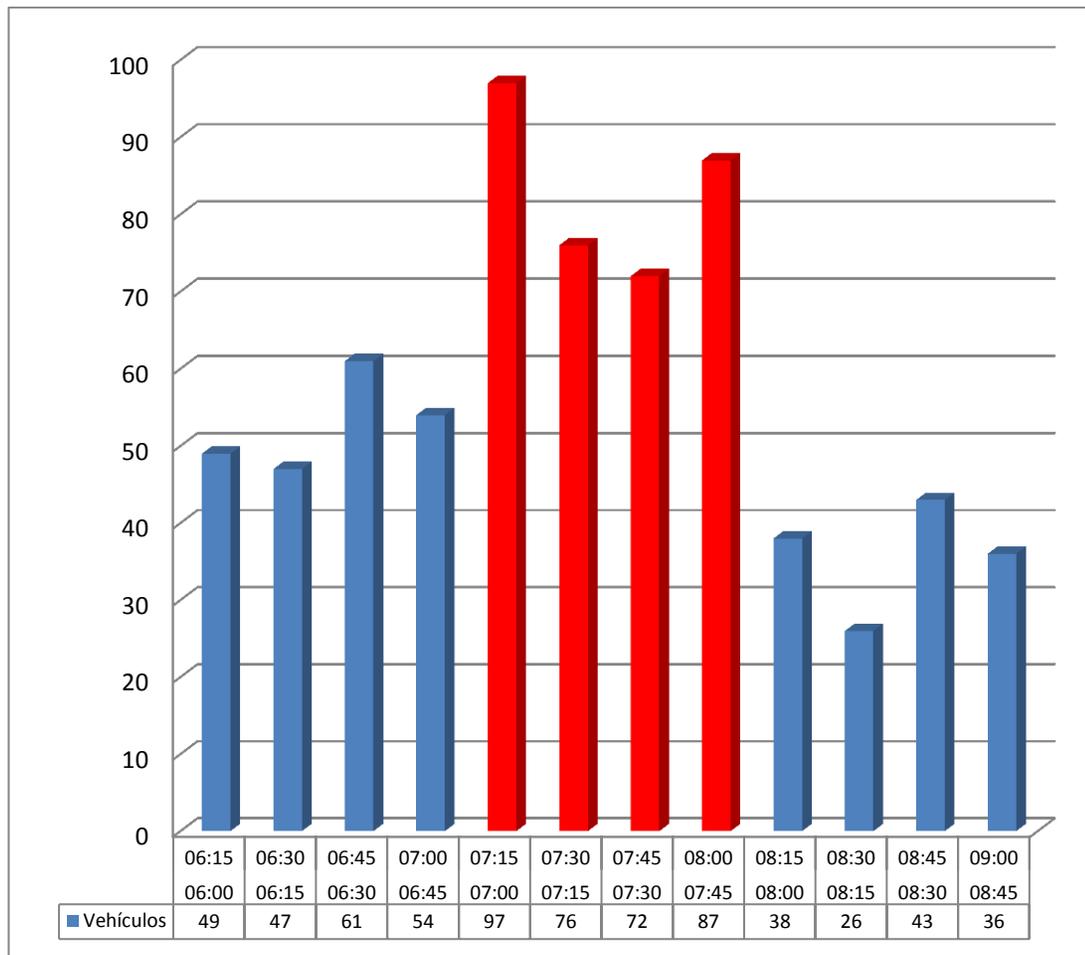
Figura 26. Estación de recaudo de peaje Los Curos. Fuente: [www.skyscraperlife.com](http://www.skyscraperlife.com)

#### **6.4.1. Determinación hora de máxima demanda semanal**

Para el estudio de esta estación de recaudo de peaje se empleó la semana comprendida entre el 19 y el 25 de mayo de 2013.

Apoyados en el reporte hora a hora del sistema empleado para establecer el recaudo, se observó que la hora de máximo tráfico de la semana en estudio corresponde al día lunes 20 de mayo de 2013, entre las 7 y las 8 horas, con 332 vehículos.

Con el fin de determinar la hora de máxima demanda se realizaron aforos de 15 minutos sobre video entre las 6:00 hasta las 9:00, obteniendo que la hora de máxima demanda se identificó entre las 7:00 y las 8:00 del 20 de mayo de 2013 con un total de 332 vehículos. Se obtuvo un factor de hora pico de  $FHP=0.86$ .



**Figura 27. Los Cueros - Aforo para determinar hora de máxima demanda**  
Fuente: Elaboración propia

#### 6.4.2. Tiempos de atención en el sistema

En la hora de máxima demanda se midieron los tiempos de los pelotones de vehículos identificados en el video, desde la llegada del primer vehículo hasta la salida del último, para obtener unos tiempos medios de atención efectiva en el sistema, en diferentes composiciones vehiculares, para poder establecer el tiempo medio para cada una de las categorías, obteniéndose los siguientes resultados:

En promedio es atendido 1 vehículo cada 17 segundos

Los tiempos de atención por cada una de las categorías observadas fueron:

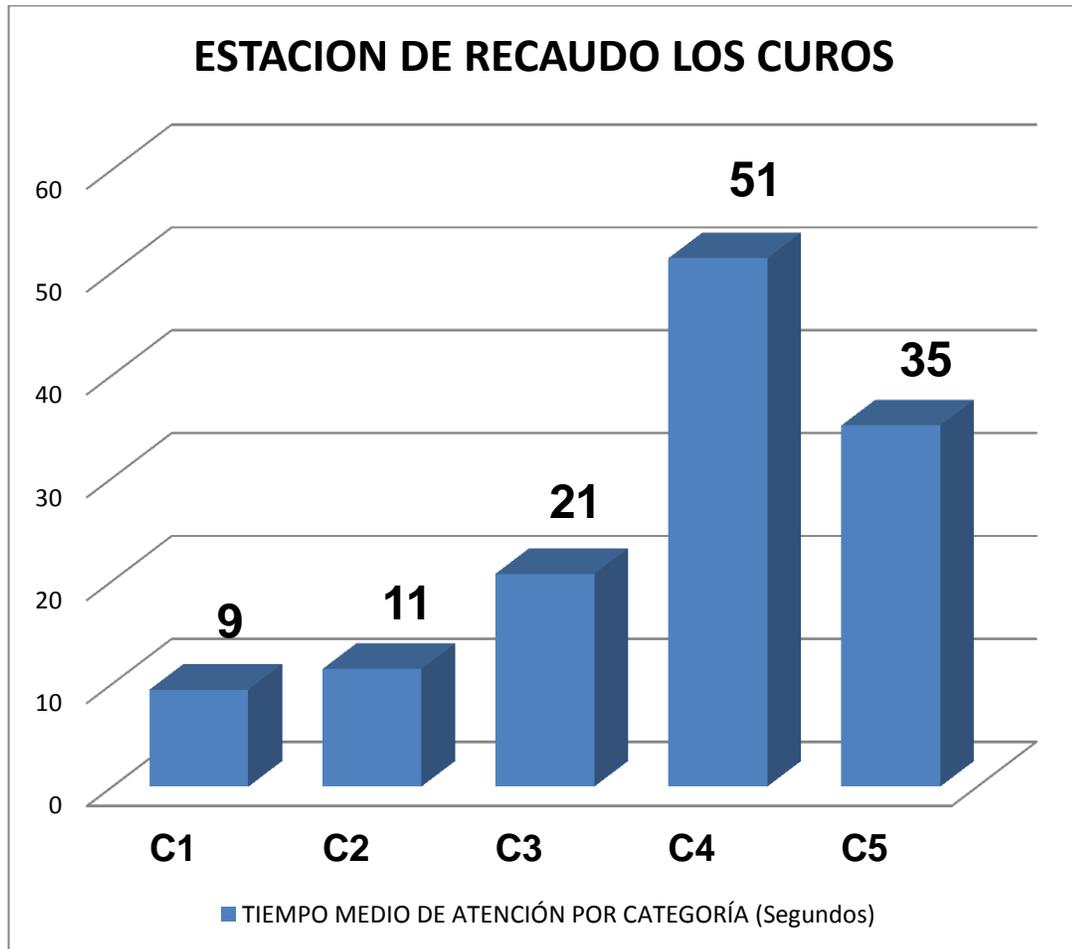


Figura 28. Tiempos de atención por categoría Peaje Los Curos. Fuente: Elaboración propia

- Categoría 1 : 9 segundos / vehículo
- Categoría 2 : 11 segundos / vehículo
- Categoría 3 : 21 segundos / vehículo
- Categoría 4 : 51 segundos / vehículo
- Categoría 5 : 35 segundos / vehículo

### 6.4.3. Indicadores operativos

Para el análisis de esta estación de recaudo de peaje, y de acuerdo a lo observado durante la hora de máxima demanda se obtuvieron los siguientes parámetros promedio por carril:

Tabla 4. Parámetros estación de recaudo de peaje Los Curos

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de arribo	$\lambda =$	166 vph
Tasa de servicio	$\mu =$	213 vph
Relación tasas de arribo y servicio	$\rho = \lambda / \mu =$	0.78

Fuente: Elaboración propia

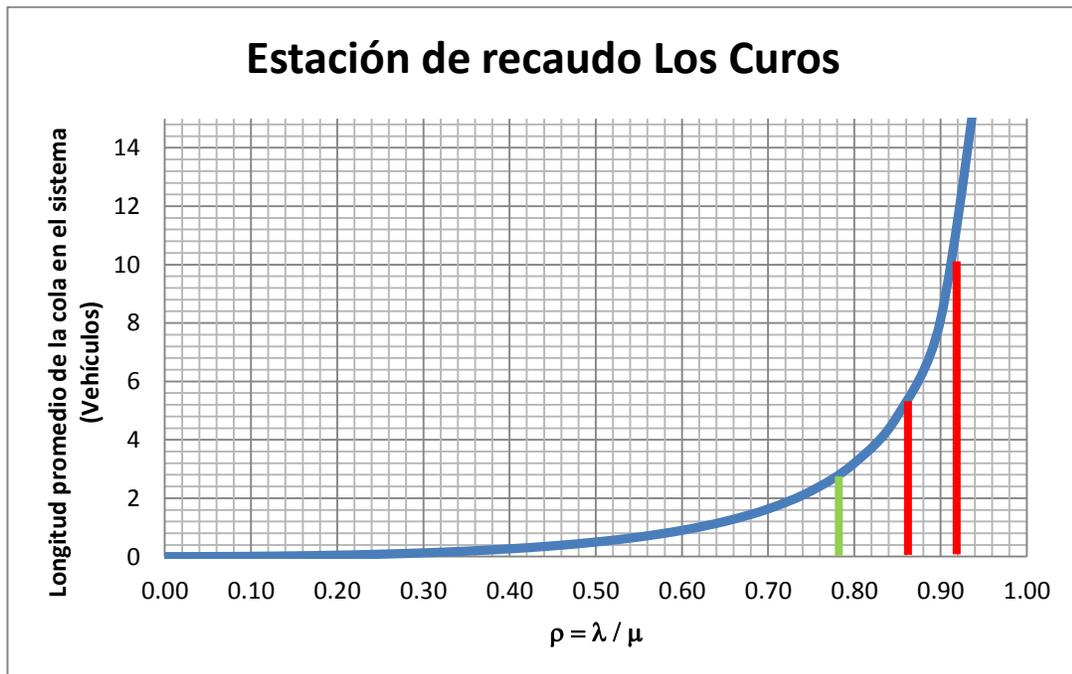


Figura 29. Los Curos - Gráfico  $\rho$  vs Longitud promedio cola en el sistema.

Fuente: Elaboración propia

**6.4.3.1. La longitud promedio de la cola en el sistema es de:**

$$E(m) = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = 3 \text{ veh\u00edculos}$$

Teniendo en cuenta que la relaci\u00f3n entre tasa de arribo vs tasa de servicio para una cola de 5 veh\u00edculos es de 0.86 y para 10 veh\u00edculos es de 0.92, para las evaluaciones se tomar\u00e1 una cola m\u00e1xima de 5 veh\u00edculos, siendo esta la m\u00e1s cr\u00edtica para cumplir con las obligaciones contractuales.

**6.4.3.2. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 5 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 5 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 22 \%$$

**6.4.3.3. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 10 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 10 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 6 \%$$

**6.4.3.4. N\u00famero de unidades esperadas en el sistema**

Para determinar el n\u00famero de unidades esperadas en el sistema, podemos determinarlo mediante dos escenarios.

El primer escenario es considerando colas infinitas, no saturadas, de carril \u00fanico:

$$E(n) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = 4 \text{ veh\u00edculos}$$

El segundo escenario es si consideramos que la cola es finita, no saturada, de carril único. Para este caso la capacidad máxima de la cola es de  $N = 5$  vehículos.

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} * \frac{1-(N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}}{1-\rho^{N+1}} = 2 \text{ vehículos}$$

#### 6.4.3.5. Tiempo promedio de espera en cola

$$E(w) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = 60 \text{ segundos}$$

#### 6.4.3.6. Porcentaje de tiempo en que la rampa está llena

$$P(n) = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} * \rho^n = 8 \%$$

#### 6.4.3.7. Probabilidad de gastar 60 seg o menos en el sistema

$$P(v \leq t) = 1 - e^{-\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} = 100 \%$$

### 6.4.4. Diagnóstico de la situación actual

En el momento del estudio, la estación de peaje de recaudo de Los Cueros atiende el 78% de la tasa de servicio observada, con tiempo de espera de 60 segundos en promedio para ser atendidos y cuatro vehículos en el sistema por carril.

Estimando que el crecimiento del parque automotor sea similar al crecimiento de la economía para el periodo 2009-2013, el cual corresponde a 4.2%<sup>4</sup>, se esperaría que en 3.9 años se presenten colas de 5 vehículos cuando la tasa de arribo por carril sea de 181 vehículos/hora/carril, con tiempo de espera de 1 minuto.

---

<sup>4</sup> Banco Mundial, <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

De igual manera se espera que en 12.0 años se presenten colas de 10 vehículos con una tasa de arribo de 195 vehículos/hora/carril con tiempo de espera de 3 minutos y 4 segundos.

En el momento la capacidad de la estación de recaudo es suficiente para atender la demanda actual, sin embargo debe iniciarse la ampliación de capacidad de la estación de recaudo, ya que se encuentra próxima a llegar a su capacidad, sin embargo se observa demoras en la atención de los vehículos comerciales de categorías 5 y 6, principalmente por la clasificación que debe realizar la recaudadora, ya que algunos camiones levantan ejes para que solo les cobren los ejes rodantes, sin embargo hay una directriz de INVIAS donde si el camión va cargado se cobran todos los ejes aunque no sean rodantes, en esta verificación se presentan demoras en la atención del vehículo en el sistema.

Si se logra mejorar los tiempos de atención a los 300 vehículos/hora/carril<sup>5</sup> que indica INVIAS para el contrato de recaudo, esta estación presentaría colas de 5 vehículos en 10 años y colas de 10 vehículos en 12.2 años, postergando las inversiones en ampliación de esta estación de recaudo de peaje.

---

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Vías, Contrato 250 de 2011, Apéndice D Obligaciones Operativas – Administrativas, Pag. 10

## 6.5. Estación de recaudo de Peaje Saboyá

La estación de recaudo de peaje de Saboyá se encuentra en el departamento de Boyacá, en el momento de la evaluación esta estación de recaudo estaba a cargo del Instituto Nacional de Vías, bajo el Contrato de Concesión de Recaudo 250 de 2011, funcionando con boletería manual. Desde el mes de noviembre de 2013 la Agencia Nacional de Infraestructura adjudicó el corredor de Zipaquirá – El Palenque (Bucaramanga) al Consorcio Hidalgo e Hidalgo Colombia S.A.S.

Se encuentra sobre la vía Ubaté – Puente Nacional en el PR66, de la Ruta 45A.

En esta estación de recaudo de Peaje tiene cobro en ambos sentidos. Cuenta con 3 carriles para el recaudo del peaje.

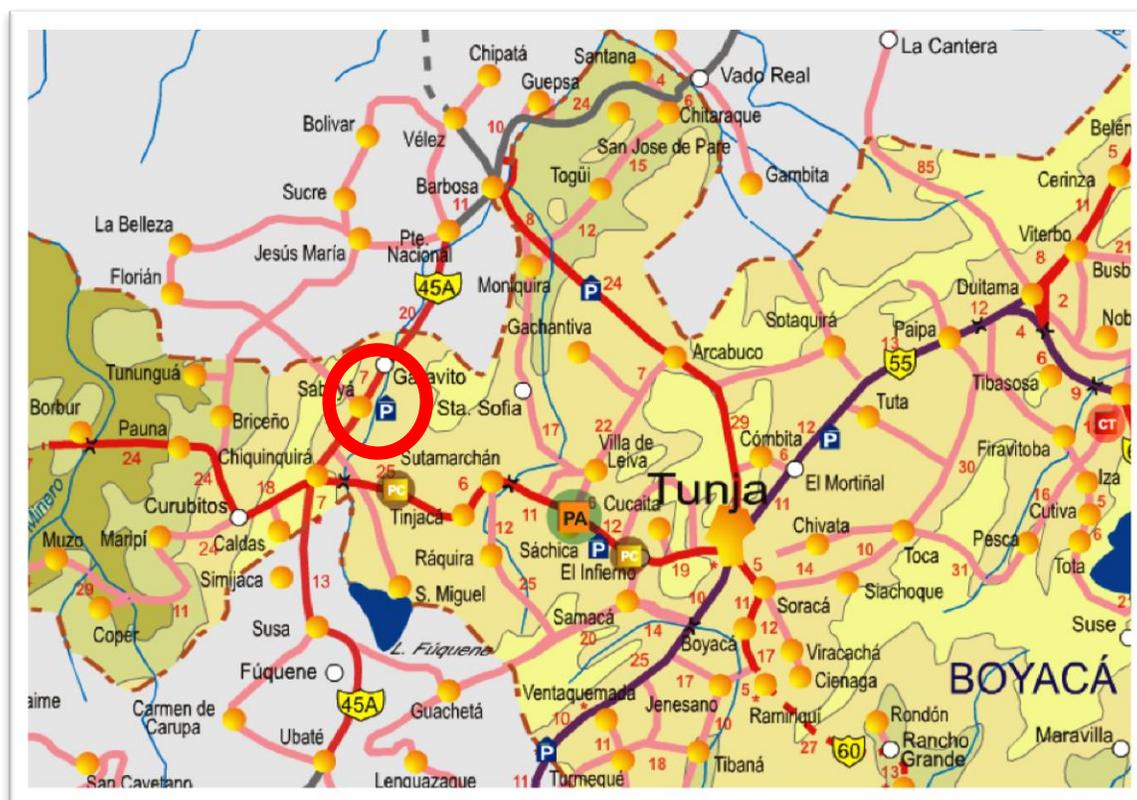


Figura 30. Ubicación estación de recaudo Saboyá. Fuente: [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co)

Durante la semana del 17 al 23 de noviembre de 2013 se observó un TPD<sub>S</sub> de 2719 vehículos.



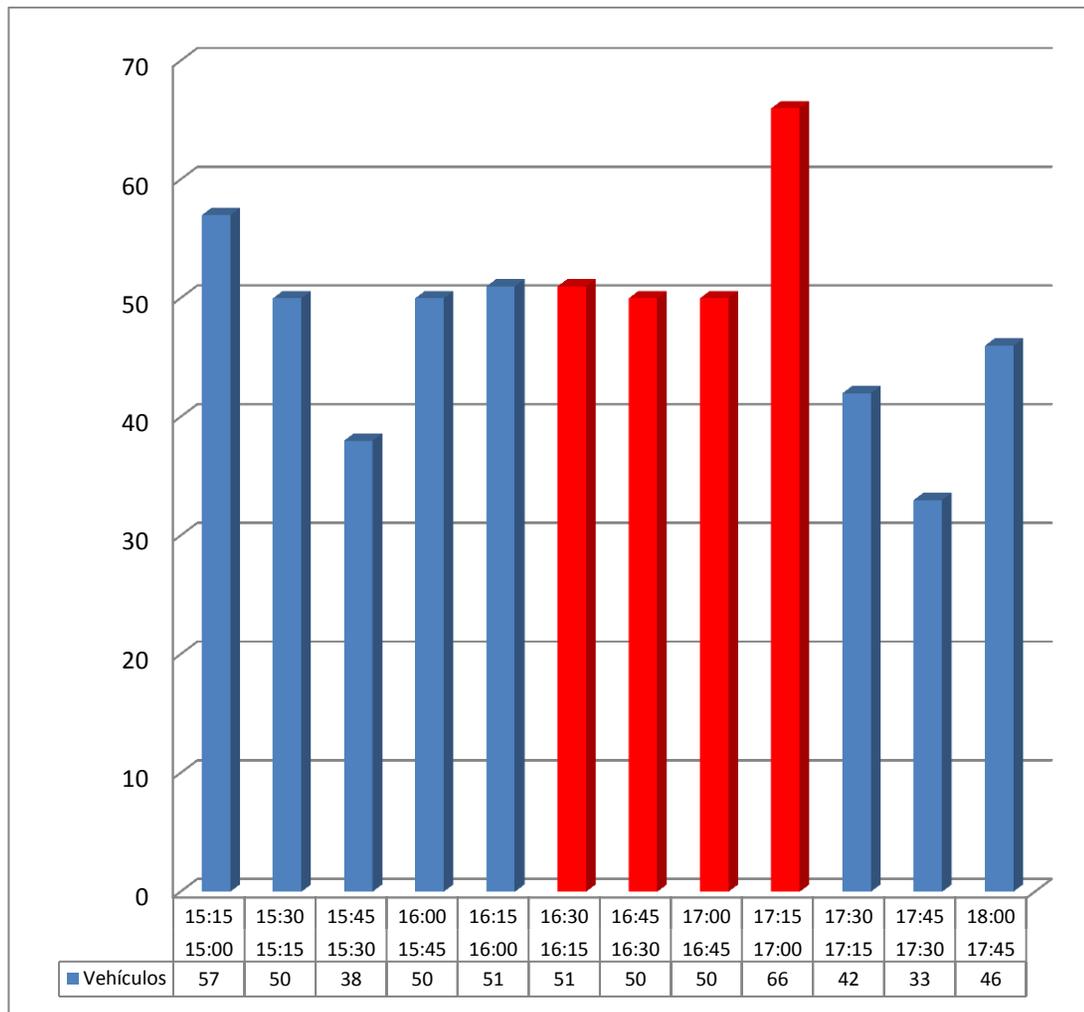
Figura 31. Estación de recaudo de peaje Saboyá. Fuente: Cano Jiménez Estudios S.A.

### **6.5.1. Determinación hora de máxima demanda semanal**

Para el estudio de esta estación de recaudo de peaje se empleó la semana comprendida entre el 17 y el 23 de noviembre de 2013.

Apoyados en el reporte hora a hora del sistema empleado para establecer el recaudo, se observó la hora de máximo tráfico de la semana en estudio corresponde al día lunes 18 de noviembre de 2013, entre las 16 y las 17 horas, con 202 vehículos.

Con el fin de determinar la hora de máxima demanda se realizaron aforos de 15 minutos sobre video entre las 15:15 hasta las 18:45, obteniendo que la hora de máxima demanda se identificó entre las 16:15 y las 17:15 del 18 de noviembre de 2013 con un total de 217 vehículos. Se obtuvo un factor de hora pico de  $FHP=0.82$ .



**Figura 32. Saboyá - Aforo para determinar hora de máxima demanda**  
Fuente: Elaboración propia

### 6.5.2. Tiempos de atención en el sistema

En la hora de máxima demanda se midieron los tiempos de los pelotones de vehículos identificados en el video, desde la llegada del primer vehículo hasta la salida del último, para obtener unos tiempos medios de atención efectiva en el sistema, en diferentes composiciones vehiculares, para poder establecer el tiempo medio para cada una de las categorías, obteniéndose los siguientes resultados:

En promedio es atendido 1 vehículo cada 12 segundos

Los tiempos de atención por cada una de las categorías observadas fueron:

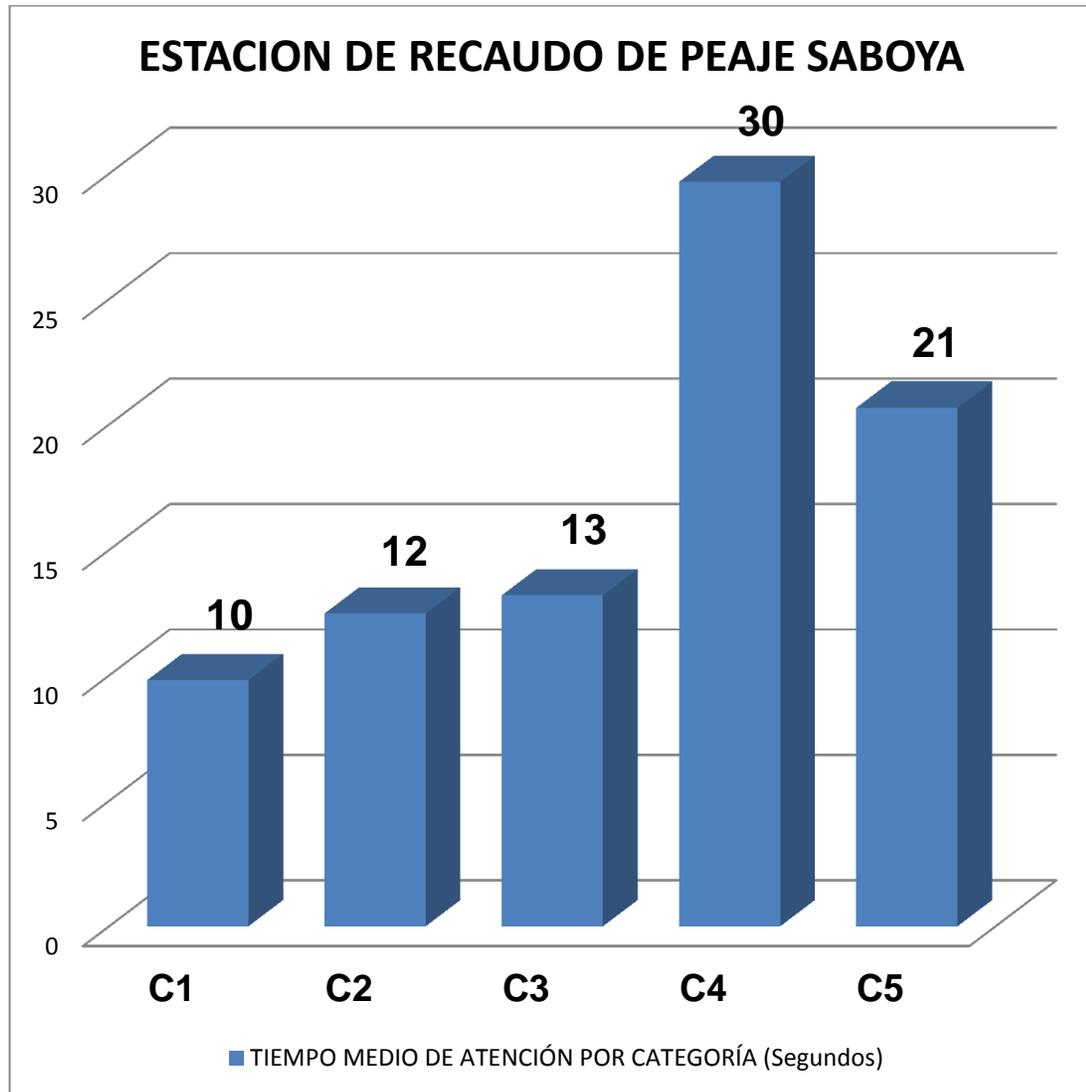


Figura 33. Tiempos de atención por categoría Peaje Saboyá. Fuente: Elaboración propia

Categoría 1 : 10 segundos / vehículo

Categoría 2 : 12 segundos / vehículo

Categoría 3 : 13 segundos / vehículo

Categoría 4 : 30 segundos / vehículo

Categoría 5 : 21 segundos / vehículo

### 6.5.3. Indicadores operativos

Para el análisis de esta estación de recaudo de peaje, y de acuerdo a lo observado durante la hora de máxima demanda se obtuvieron los siguientes parámetros promedio por carril:

Tabla 5. Parámetros estación de recaudo de peaje Saboyá

Parámetro	Símbolo	Valor
Tasa de arribo	$\lambda =$	73 vph
Tasa de servicio	$\mu =$	290 vph
Relación tasas de arribo y servicio	$\rho = \lambda / \mu =$	0.25

Fuente: Elaboración propia

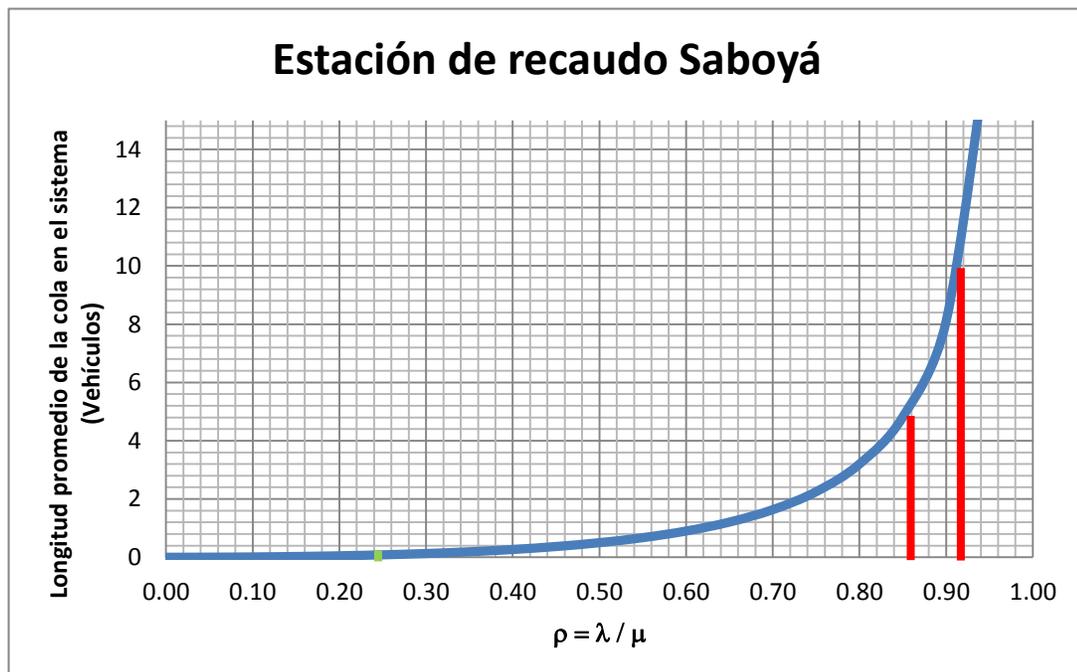


Figura 34. Saboyá - Gráfico  $\rho$  vs Longitud promedio cola en el sistema

Fuente: Elaboración propia

**6.5.3.1. La longitud promedio de la cola en el sistema es de:**

$$E(m) = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = 1 \text{ veh\u00edculo}$$

Teniendo en cuenta que la relaci\u00f3n entre tasa de arribo vs tasa de servicio para una cola de 5 veh\u00edculos es de 0.86 y para 10 veh\u00edculos es de 0.92, para las evaluaciones se tomar\u00e1 una cola m\u00e1xima de 5 veh\u00edculos, siendo esta la m\u00e1s cr\u00edtica para cumplir con las obligaciones contractuales.

**6.5.3.2. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 5 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 5 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 0 \%$$

**6.5.3.3. Probabilidad de que haya m\u00e1s de 10 veh\u00edculos por carril en el sistema**

Para N = 10 veh\u00edculos

$$P(n > N) = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{N+1} = 0 \%$$

**6.5.3.4. N\u00famero de unidades esperadas en el sistema**

Para determinar el n\u00famero de unidades esperadas en el sistema, podemos determinarlo mediante dos escenarios.

El primer escenario es considerando colas infinitas, no saturadas, de carril \u00fanico:

$$E(n) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = 1 \text{ veh\u00edculo}$$

El segundo escenario es si consideramos que la cola es finita, no saturada, de carril \u00fanico. Para este caso la capacidad m\u00e1xima de la cola es de N = 5 veh\u00edculos.

$$E(n) = \frac{\rho}{1-\rho} * \frac{1-(N+1)\rho^N + N\rho^{N+1}}{1-\rho^{N+1}} = 1 \text{ veh\u00edculo}$$

#### 6.5.3.5. Tiempo promedio de espera en cola

$$E(w) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = 5 \text{ segundos}$$

#### 6.5.3.6. Porcentaje de tiempo en que la rampa est\u00e1 llena

$$P(n) = \frac{1-\rho}{1-\rho^{N+1}} * \rho^n = 0 \%$$

#### 6.5.3.7. Probabilidad de gastar 60 seg o menos en el sistema

$$P(v \leq t) = 1 - e^{-\left(1-\frac{\lambda}{\mu}\right)\mu t} = 100 \%$$

### 6.5.4. Diagn\u00f3stico de la situaci\u00f3n actual

En el momento del estudio, la estaci\u00f3n de peaje de recaudo de Saboy\u00e1 atiende el 25% de la tasa de servicio observada, con tiempo de espera de 5 segundos en promedio para ser atendidos y un veh\u00edculo en el sistema por carril.

Estimando que el crecimiento del parque automotor sea similar al crecimiento de la econom\u00eda para el periodo 2009-2013, el cual corresponde a 4.2%<sup>6</sup>, se esperar\u00eda que en 29.9 a\u00f1os se presenten colas de 5 veh\u00edculos cuando la tasa de arribo por carril sea de 247 veh\u00edculos/hora/carril, con tiempo de espera de 1 minuto y 12 segundos.

De igual manera se espera que en 31.6 a\u00f1os se presenten colas de 10 veh\u00edculos con una tasa de arribo de 265 veh\u00edculos/hora/carril con tiempo de espera de 2 minutos y 12 segundos.

---

<sup>6</sup> Banco Mundial, <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

En el momento la capacidad de la estación de recaudo es suficiente para atender la demanda actual.

Al igual que en la estación de recaudo de peaje de Los Curos, se observa demoras en la atención de los vehículos comerciales de categorías 5 y 6, principalmente por la clasificación que debe realizar la recaudadora, ya que algunos camiones levantan ejes para que solo les cobren los ejes rodantes, sin embargo hay una directriz de INVIAS donde si el camión va cargado se cobran todos los ejes aunque no sean rodantes, en esta verificación se presentan demoras en la atención del vehículo en el sistema.

## 6.6. Propuesta de Formulación para Dimensionamiento

- $\rho$  Se empleará un valor de 0.92, la cual es la relación entre  $\lambda / \mu$  donde se observa una cola de 10 vehículos.

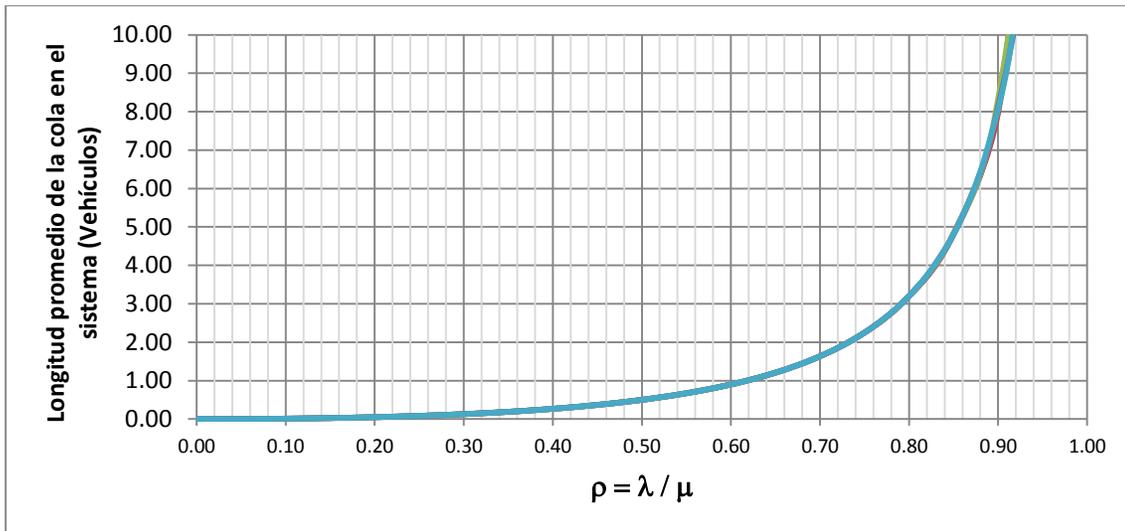


Figura 35. Gráfico para determinación de cola requerida en función de  $\rho$ .  
Fuente. Elaboración Propia

- $\mu$  Está dado por el máximo número de autos que pueden ser atendidos en una hora, teniendo en cuenta que se observó que un auto es atendido en 13 segundos, esto quiere decir que la tasa máxima de servicio corresponde a 276 autos/hora.

C1, C2, C3, C4 Y C5 Corresponden al número de vehículos por cada una de categorías INVIAS previstas para el año n en la hora de máxima demanda. El número de vehículos corresponderá a los del sentido susceptible de cobro, en el caso de cobro en un sentido.

- N Número de carriles requeridos para atender la demanda de vehículos en el año n. En el caso de que el peaje tenga telepeaje se deben incrementar en mínimo un carril adicional por sentido, de uso exclusivo de este sistema. En el caso de que el número de carriles sea impar y la vía de una calzada de doble sentido, al menos el carril central debe ser reversible.

$$N = \frac{13 * C1 + 15 * C2 + 24 * C3 + 30 * C4 + 33 * C5}{3300}$$

## Capítulo 7

### Conclusiones

- La tasa de servicio depende de la composición vehicular que transita por la vía sobre la cual se encuentre instalado o se proyecte instalar un peaje, el uso del indicador de 300 vehículos/hora-carril empleado por INVIAAS en su contrato de recaudo es aplicable solamente en el caso en el cual por la estación de recaudo solo pasen autos, en el caso en el que el tránsito sea predominantemente camiones este indicador no se puede cumplir, ya que al requerir mayor tiempo en su clasificación y despeje la tasa de servicio es considerablemente menor.
- Teniendo en cuenta lo anteriormente enunciado, aunque dos estaciones de recaudo cuenten con la misma tasa de arribo, dependiendo de la tasa de servicio media pueden necesitar infraestructuras diferentes, de manera que la capacidad sea la necesaria para cumplir con las colas máximas permitidas por carril.

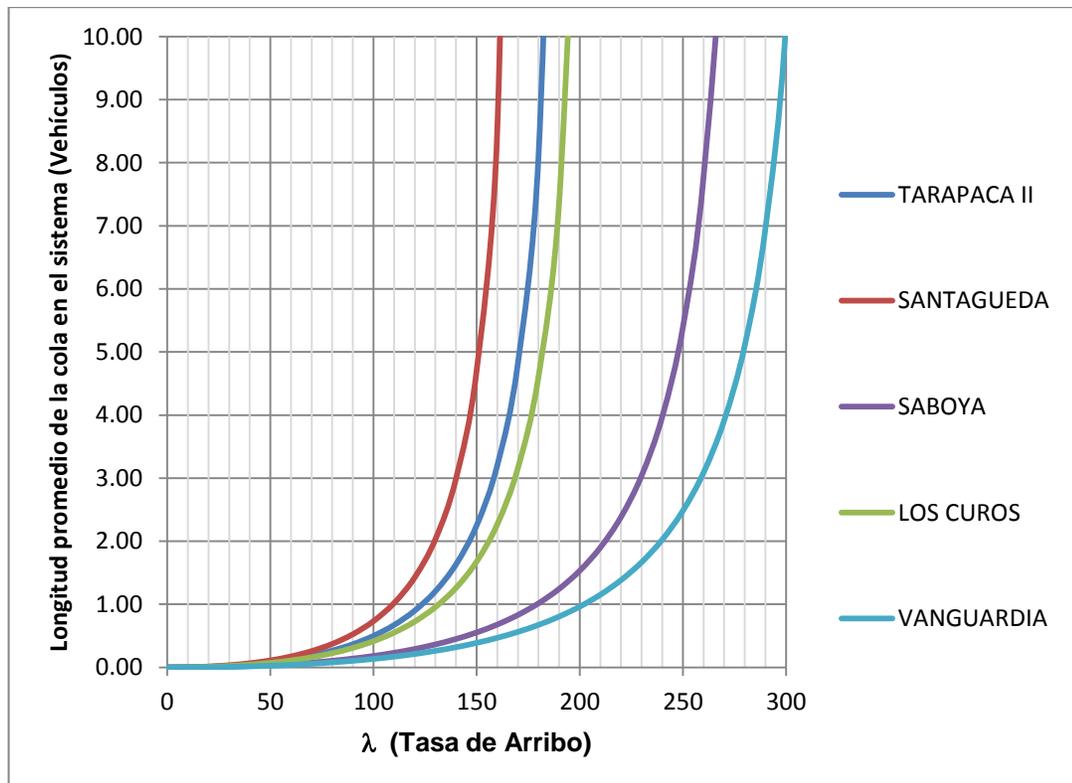


Figura 36. Colas en función de tasa de arribo. Fuente. Elaboración propia

- En el estudio realizado se obtiene que la estación de recaudo de peaje más eficiente es el de Vanguardia con una tasa de servicio de 327 vph, mientras que la estación de recaudo menos eficiente para la atención de los usuarios en el sistema fue la estación de recaudo de Santágueda con una tasa de servicio de 177 vph.
- En la gráfica de relación de tasas de arribo y servicio vs la longitud promedio de la cola, se observa que cuando la relación es de 0.70 comienza a volverse asintótica, de manera que cuando esta relación es de 0.85 se esperan colas de 5 vehículos y rápidamente crece a una relación de 0.92 cuando se esperan colas de 10 vehículos.

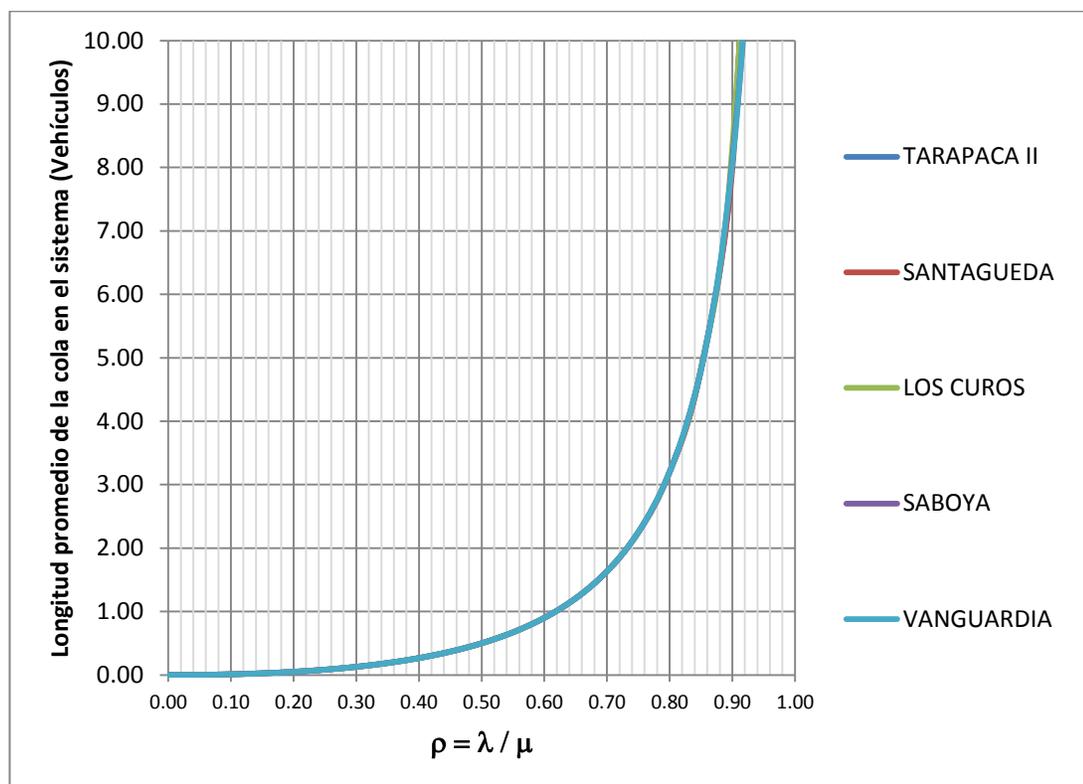


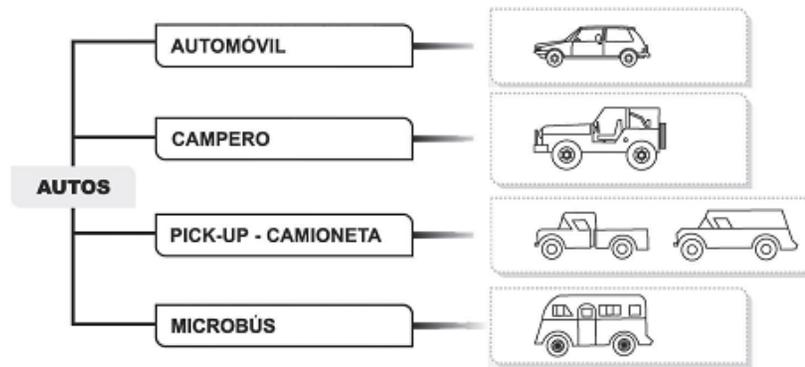
Figura 37. Longitud de colas en función de  $\rho$  para los diferentes peajes.  
Fuente. Elaboración propia

- Teniendo en cuenta que en los contratos que involucran recaudo de peaje por la utilización de las vías, ya sean a cargo del gobierno o vías Concesionadas, la condición de operación es que no hayan más de 5 camiones o 10 vehículos, cabe la posibilidad que en un instante lleguen simultáneamente 5 o más camiones, teniendo en cuenta que estos son los de menor velocidad operativa y que no tiene la facilidad de adelantamiento, es común que estos lleguen en pelotones; teniendo

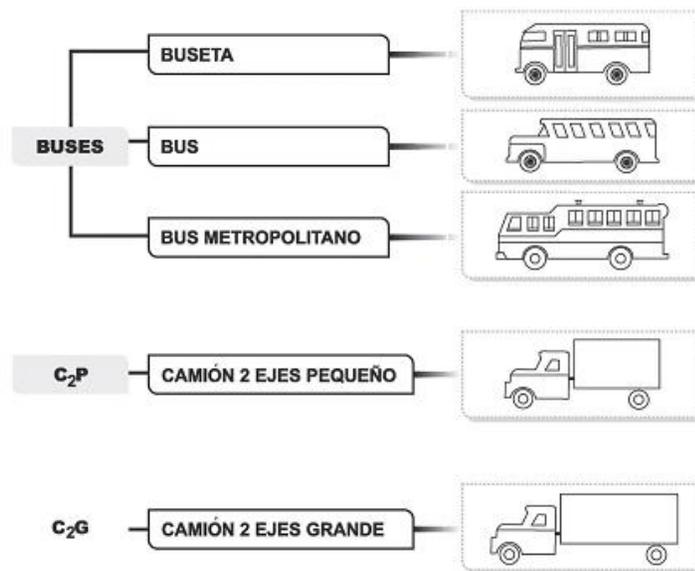
en cuenta esto, es importante considerar en las operaciones de los peajes para el estudio colas no mayores a 5 vehículos.

- Se observó que en las estaciones estudiadas no hay exigencia de cumplimiento de unas tasas de servicio, de manera que entre menor sean las tasas de arribo, la operación es más relajada, presentando menores tasas de servicio efectivas, mientras en las estaciones de mayor tasa de arribo la tasa de servicio es más eficiente.
- A continuación se presentan los tiempos de atención observados por categoría, siendo cada categoría la siguiente clasificación:

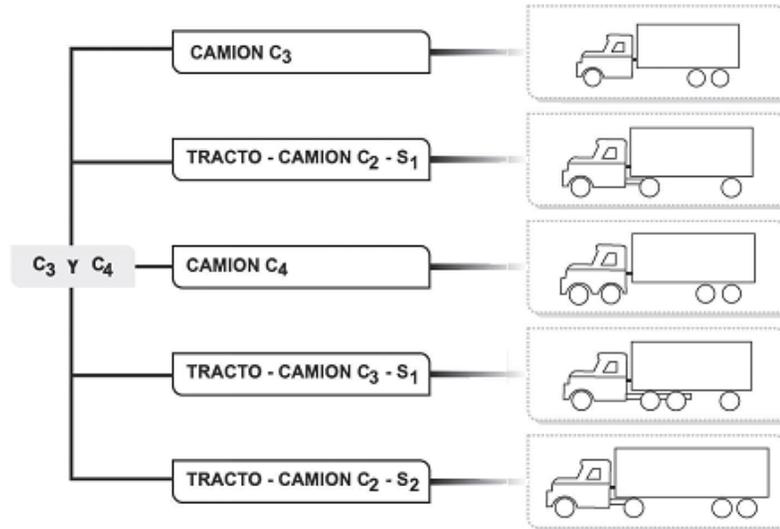
### C1 Automóviles



### C2 Buses y camiones de dos ejes



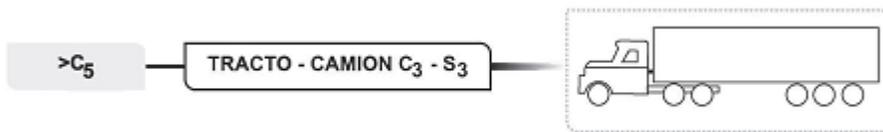
C3 Camiones rígidos o articulados de tres ejes o cuatro ejes



C4 Camiones articulados de cinco ejes



C5 Camiones articulados de cinco ejes o más



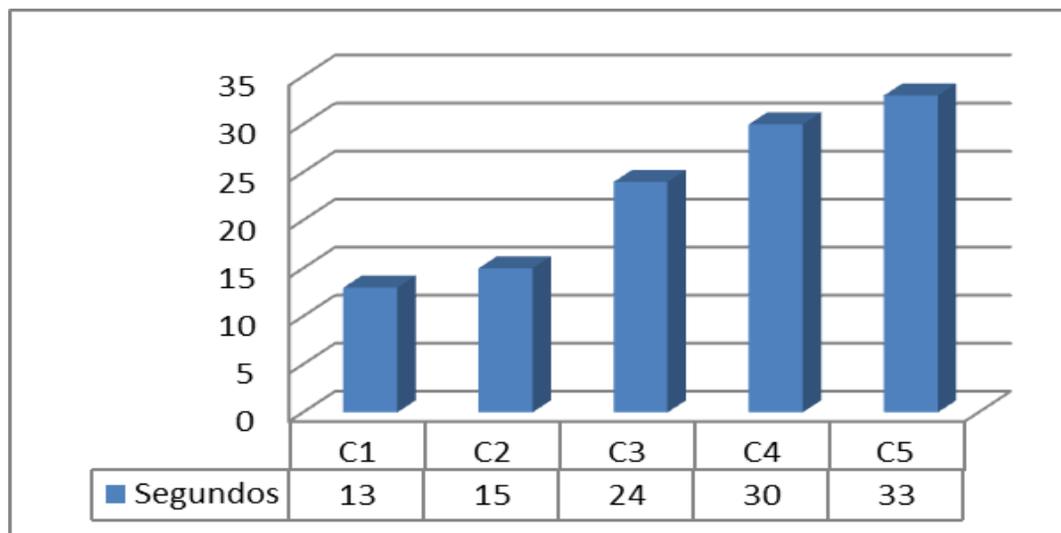


Figura 38. Tiempos de atención y despeje por categorías. Fuente. Elaboración propia

- En ninguno de los contratos de recaudo contempla la implementación de sistemas ITS que permitan medir las tasas de servicio que lleven a unos indicadores de atención a los usuarios.
- En las estaciones de recaudo en vías Concesionadas, para los camiones con semirremolque cobran los ejes rodantes, de manera que los tiempos de atención de estos tipos de vehículos es más ágil que en las estaciones a cargo del INVIAS, donde la recaudadora además de verificar los ejes rodantes, debe verificar si el camión transita cargado o no, en caso de que el camión esté cargado se cobra la tarifa por el tipo de camión y no por los ejes rodantes, afectando los tiempos de atención de estos tipos de vehículos.
- Aunque los tiempos de atención sean similares operativamente para un auto que para un camión con semirremolque, los autos por ser más livianos tienen un menor tiempo de despeje que un semirremolque el cual tiene una menor aceleración al arrancar debido a la carga que transportan y por tener una mayor longitud requiere un mayor tiempo de despeje, el cual oscila en unos 10 – 12 segundos más que lo que requiere un auto.
- Un factor que determina los tiempos de operación es el sistema empleado para la tasa de recaudo, observando que presenta una tasa de servicio más eficiente aquellas estaciones con operación manual que el que emplea software para registrar el cobro y generar el recibo de pago.
- Se propone la ecuación presentada en el numeral 6.6 con las consideraciones establecidas para determinar el número de carriles requeridos para atender la

demanda de vehículos en la estación de peaje y que no presente colas superiores a 10 vehículos sin importar la composición vehicular que presente la vía.

C1, C2, C3, C4 Y C5 Corresponden al número de vehículos por cada una de categorías INVIAS previstas para el año n en la hora de máxima demanda. El número de vehículos corresponderá a los del sentido susceptible de cobro, en el caso de cobro en un sentido.

N Número de carriles requeridos para atender la demanda de vehículos en el año n. En el caso de que el peaje tenga telepeaje se deben incrementar en mínimo un carril adicional por sentido, de uso exclusivo de este sistema. En el caso de que el número de carriles sea impar y la vía de una calzada de doble sentido, al menos el carril central debe ser reversible.

$$N = \frac{13 * C1 + 15 * C2 + 24 * C3 + 30 * C4 + 33 * C5}{3300}$$

## Capítulo 8

### Recomendaciones

Es importante que en las nuevas Concesiones de 4G se establezcan indicadores contractuales que midan la eficiencia en la operación de recaudo de peajes, mediante equipos especializados, de manera que le puedan ofrecer a los usuarios un servicio de calidad, optimizando las inversiones en la construcción de las estaciones de recaudo, en lugar de construir estaciones sobredimensionadas debido a la ineficiencia en la operación.

En los anexos Operativos de las Concesiones se debe determinar para cada estación de recaudo de Peaje cuantos carriles debe tener, teniendo como base el estudio de tránsito, composición vehicular y crecimiento del mismo, datos necesarios para la determinación de los ingresos esperados.

No es recomendable la instalación de varias casetas en una misma fila, como es el caso del peaje de Andes sobre la Autopista Norte a la salida de Bogotá, ya que el tiempo de atención y despeje está dado por el mayor tiempo empleado por los vehículos que están siendo atendidos, en el caso que por problemas prediales o técnico no quepan los carriles en la franja disponible, se puede considerar bloques de casetas de manera escalonada.

Incentivar el uso de vales prepago para el pago de la tasa de peaje, lo cual optimiza el tiempo de atención, ya que el pago es exacto y no requiere dar vueltas.

Implementar en las estaciones de recaudo de peaje sistemas de telepeaje, de manera que los vehículos que cuenten con los dispositivos puedan transitar por la estación sin tener que detenerse, manteniendo su velocidad media operativa. Con la instalación de sistemas de telepeaje es importante darle facilidad a los usuarios para recargar el saldo. Diversos Concesionarios han implementado estos sistemas pero son exclusivos para cada Concesión.

Se deben unificar las categorías de cobro para los vehículos a partir de parámetros establecidos para tal fin, ya que las categorías cambian dependiendo de la entidad a cargo de la estación de recaudo.

El gobierno debe establecer un estándar para la implementación de telepeajes, los cuales sean admitidos en todas las estaciones de recaudo sin importar a que Concesión pertenece o si está a cargo de INVIAS.

El personal que atiende en las casetas de cobro debe ser personal idóneo y calificado para realizar la labor, con el fin de minimizar las pérdidas de tiempo debido al factor humano.

## Capítulo 9

### Bibliografía

BALLOU, Ronald H. Logística. Administración de la Cadena de Suministro. Quinta Edición. Editorial Pearson, 2004

CAL Y MAYOR, Rafael y CARDENAS GRISALES, James. Ingeniería de Tránsito Fundamentos y aplicaciones. Octava edición. México, Alfaomega, 2007. 597 p.

CAO ABAD, Ricardo. Introducción a la simulación y a la teoría de colas. Coruña (España), NETBIBLO, S.L., 2002. 224 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 28 P. NTC 1486.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Contrato INVIAS 250 de 2011 cuyo objeto es la Concesión para la operación, explotación, organización y gestión total del servicio de recaudo de las tasas de peaje en las estaciones de peaje y la operación de las estaciones de pesaje, que se encuentran a cargo del INVIAS. 2011.

TIMANÁ ROJAS, Jorge. Introducción a la teoría de colas. Lima (Perú). Universidad de Piura. 12 p.

## Capítulo 10

### Anexos

#### Anexo 1. Glosario

**Capacidad de la cola:** Es el máximo número de clientes que pueden estar haciendo cola (antes de comenzar a ser servidos). Para el caso de las estaciones de recaudo se supone finita, correspondiente a 10 autos o 5 camiones.

**Cola:** propiamente dicha, es el conjunto de clientes que esperan ser atendidos en la caseta de recaudo, es decir los clientes que necesitan continuar por la vía donde se encuentra la estación de recaudo pero aún no han llegado al punto de recaudo de peaje.

**Cliente:** Es todo individuo de la población potencial que solicita servicio. Suponiendo que los tiempos de llegada de clientes consecutivos son  $0 < t_1 < t_2 < \dots$ , será importante conocer el patrón de probabilidad según el cual la fuente de entrada genera clientes. Lo más habitual es tomar como referencia los tiempos entre las llegadas de dos clientes consecutivos, fijando su distribución de probabilidad. Cuando la población potencial es finita, la distribución de los  $T_k$  variará según el número de clientes en proceso de ser atendidos.

**Disciplina de la cola:** Es el modo en el que los clientes son seleccionados para ser servidos. Las disciplinas más habituales son:

La disciplina FIFO (first in first out), también llamada FCFS (first come first served): según la cual se atiende primero al cliente que antes haya llegado.

La disciplina LIFO (last in first out), también conocida como LCFS (last come first served) o pila: que consiste en atender primero al cliente que ha llegado de último.

La RSS (random selection of service), o SIRO (service in random order), que selecciona a los clientes de forma aleatoria.

Para el caso del estudio, aplica la disciplina FIFO y donde haya telepeajes con carriles dedicados aplica la disciplina LIFO, pero esta disciplina no genera colas, ya que los vehículos mantienen la velocidad operativa.

**Estado del sistema :** Número de clientes en el sistema.

$\lambda$  : Tasa media de llegadas (número esperado de llegadas por unidad de tiempo) de nuevos clientes cuando hay  $n$  clientes en el sistema.

**Longitud de la cola:** Número de clientes que esperan servicio.

$\mu$  : Tasa media de servicio para todo el sistema (número esperado clientes que completan su servicio por unidad de tiempo) cuando hay  $n$  clientes en el sistema.

**Mecanismo de servicio:** Es el procedimiento por el cual se da servicio a los clientes que lo solicitan. Para determinar totalmente el mecanismo de servicio debemos conocer el número de servidores de dicho mecanismo (si dicho número fuese aleatorio, la distribución de probabilidad del mismo) y la distribución de probabilidad del tiempo que le lleva a cada servidor dar un servicio. En caso de que los servidores tengan distinta destreza para dar el servicio, se debe especificar la distribución del tiempo de servicio para cada uno.

Para la estaciones de recaudo de peaje los servidores son mixtos, de manera que el tiempo de servicio esperado depende de la composición vehicular. En dos estaciones de recaudo de peaje con un mismo TPD tienen diferentes tiempos de servicio.

**$N(t)$**  : Número de clientes en el sistema de colas en el tiempo  $t$ .

**$P_n(t)$** : Probabilidad de que exactamente  $n$  clientes estén en el sistema en el tiempo  $t$ , dado el número en el tiempo cero.

**Población potencial:** Es un conjunto de vehículos que pueden llegar a solicitar el servicio en cuestión. Podemos considerarla finita o infinita. Aunque para el caso de peajes es finita aunque esta en algunos casos es muy grande.

**$s$**  : Número de servidores en el sistema de colas.

**Sistema de la cola:** es el conjunto formado por la cola y el mecanismo de servicio, junto con la disciplina de la cola, que es lo que nos indica el criterio de qué cliente de la cola elegir para pasar al mecanismo de servicio.

Anexo 2. Tráfico Estación de Recaudo de Peaje Tarapacá II

MAYO 19 - 25 DE 2013

HORA \ DIA	19/05/2013	20/05/2013	21/05/2013	22/05/2013	23/05/2013	24/05/2013	25/05/2013	26/05/2013
00:00 a 01:00		50	48	78	74	63	109	72
01:00 a 02:00		39	53	60	62	52	79	53
02:00 a 03:00		31	64	54	78	63	74	47
03:00 a 04:00		34	50	44	55	66	57	27
04:00 a 05:00		51	52	72	66	71	57	37
05:00 a 06:00		161	140	145	143	120	124	45
06:00 a 07:00	62	323	236	244	265	261	203	
07:00 a 08:00	139	383	331	364	386	369	284	
08:00 a 09:00	185	299	357	355	382	334	263	
09:00 a 10:00	213	267	331	329	337	330	292	
10:00 a 11:00	256	314	272	296	329	314	317	
11:00 a 12:00	258	264	272	299	289	305	310	
12:00 a 13:00	285	259	292	304	298	318	350	
13:00 a 14:00	263	333	292	298	301	382	356	
14:00 a 15:00	330	279	301	342	341	369	377	
15:00 a 16:00	340	332	328	355	363	408	367	
16:00 a 17:00	387	318	247	401	409	405	370	
17:00 a 18:00	427	382	381	398	434	468	372	
18:00 a 19:00	430	319	289	406	425	426	403	
19:00 a 20:00	379	319	149	302	360	427	337	
20:00 a 21:00	289	202	181	289	248	307	320	
21:00 a 22:00	184	162	154	175	184	233	206	
22:00 a 23:00	112	129	112	121	161	181	141	
23:00 a 24:00	52	92	98	92	86	127	79	
<b>TOTALES</b>	<b>4,591</b>	<b>5,342</b>	<b>5,030</b>	<b>5,823</b>	<b>6,076</b>	<b>6,399</b>	<b>5,847</b>	<b>281</b>

Fuente: Elaboración propia

### Anexo 3. Tráfico Estación de Recaudo de Peaje Santágueda

MAYO 15 - 21 DE 2013

HORA \ DIA	15/09/2013	16/09/2013	17/09/2013	18/09/2013	19/09/2013	20/09/2013	21/09/2013	22/09/2013
00:00 a 01:00		91	141	64	95	95	159	79
01:00 a 02:00		49	75	84	66	110	106	71
02:00 a 03:00		35	89	126	108	104	78	36
03:00 a 04:00		23	70	98	69	101	76	26
04:00 a 05:00		38	40	62	61	60	56	34
05:00 a 06:00		66	72	114	101	97	80	45
06:00 a 07:00	88	80	113	158	138	138	125	
07:00 a 08:00	91	97	130	128	150	142	107	
08:00 a 09:00	104	117	92	146	120	115	104	
09:00 a 10:00	121	105	114	111	126	132	128	
10:00 a 11:00	113	99	118	145	107	150	129	
11:00 a 12:00	165	101	150	115	105	121	124	
12:00 a 13:00	161	113	121	102	139	142	136	
13:00 a 14:00	154	91	134	131	133	125	128	
14:00 a 15:00	227	117	121	122	155	151	138	
15:00 a 16:00	210	124	149	134	133	171	127	
16:00 a 17:00	230	138	134	163	145	177	200	
17:00 a 18:00	197	125	129	121	130	198	171	
18:00 a 19:00	187	136	126	199	152	184	160	
19:00 a 20:00	169	117	124	131	145	217	137	
20:00 a 21:00	111	144	132	144	128	132	115	
21:00 a 22:00	80	129	132	122	170	115	88	
22:00 a 23:00	62	111	133	129	125	143	86	
23:00 a 24:00	109	113	126	132	146	130	97	
<b>TOTALES</b>	<b>2,579</b>	<b>2,359</b>	<b>2,765</b>	<b>2,981</b>	<b>2,947</b>	<b>3,250</b>	<b>2,855</b>	<b>291</b>

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Tráfico Estación de Recaudo de Peaje Vanguardia

**MAYO 19 - 25 DE 2013**

<b>HORA \ DIA</b>	<b>19/05/2013</b>	<b>20/05/2013</b>	<b>21/05/2013</b>	<b>22/05/2013</b>	<b>23/05/2013</b>	<b>24/05/2013</b>	<b>25/05/2013</b>
00:00 a 01:00	59	28	25	40	51	40	81
01:00 a 02:00	44	44	19	25	34	31	44
02:00 a 03:00	21	34	59	38	35	47	39
03:00 a 04:00	36	34	49	31	46	64	55
04:00 a 05:00	47	84	91	86	84	62	95
05:00 a 06:00	88	231	193	196	273	80	140
06:00 a 07:00	197	446	427	346	372	6	317
07:00 a 08:00	159	340	422	353	358	721	346
08:00 a 09:00	259	361	357	329	322	459	401
09:00 a 10:00	386	330	373	310	472	401	389
10:00 a 11:00	438	353	329	411	318	343	472
11:00 a 12:00	477	368	323	330	377	333	487
12:00 a 13:00	534	318	399	335	523	500	452
13:00 a 14:00	629	295	336	361	361	302	532
14:00 a 15:00	551	376	400	448	455	505	474
15:00 a 16:00	449	419	364	426	392	483	505
16:00 a 17:00	441	387	436	449	360	430	476
17:00 a 18:00	304	407	310	386	431	486	391
18:00 a 19:00	239	305	290	286	365	341	319
19:00 a 20:00	204	241	297	207	223	321	336
20:00 a 21:00	117	232	144	193	198	241	248
21:00 a 22:00	60	124	143	94	139	185	151
22:00 a 23:00	39	99	69	78	59	134	100
23:00 a 24:00	45	57	47	44	61	74	60
<b>TOTALES</b>	<b>5,823</b>	<b>5,913</b>	<b>5,902</b>	<b>5,802</b>	<b>6,309</b>	<b>6,589</b>	<b>6,910</b>

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Tráfico Estación de Recaudo Los Curos

**MAYO 19 - 25 DE 2013**

<b>HORA \ DIA</b>	<b>19/05/2013</b>	<b>20/05/2013</b>	<b>21/05/2013</b>	<b>22/05/2013</b>	<b>23/05/2013</b>	<b>24/05/2013</b>	<b>25/05/2013</b>	<b>26/05/2013</b>
00:00 a 01:00		84	80	67	106	70	96	86
01:00 a 02:00		64	45	51	60	63	85	80
02:00 a 03:00		66	38	45	81	64	88	82
03:00 a 04:00		84	75	77	98	75	86	91
04:00 a 05:00		110	100	94	128	136	109	95
05:00 a 06:00		173	149	187	244	163	187	109
06:00 a 07:00	246	211	257	273	274	239	223	
07:00 a 08:00	221	332	180	139	251	226	198	
08:00 a 09:00	212	143	226	315	174	223	189	
09:00 a 10:00	190	213	185	189	189	143	218	
10:00 a 11:00	192	185	182	189	222	222	151	
11:00 a 12:00	213	207	197	235	198	217	225	
12:00 a 13:00	224	170	198	214	231	205	325	
13:00 a 14:00	199	184	209	180	216	208	195	
14:00 a 15:00	223	234	209	220	204	225	243	
15:00 a 16:00	203	202	175	203	200	217	222	
16:00 a 17:00	213	198	202	206	219	229	223	
17:00 a 18:00	209	165	194	164	207	268	258	
18:00 a 19:00	195	231	212	96	190	250	192	
19:00 a 20:00	163	177	160	110	188	170	172	
20:00 a 21:00	174	159	136	253	147	206	143	
21:00 a 22:00	173	165	147	201	173	192	157	
22:00 a 23:00	118	113	113	127	103	151	102	
23:00 a 24:00	106	95	78	105	112	147	98	
<b>TOTALES</b>	<b>3,474</b>	<b>3,965</b>	<b>3,747</b>	<b>3,940</b>	<b>4,215</b>	<b>4,309</b>	<b>4,185</b>	<b>543</b>

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Estación de Recaudo de Peaje de Saboyá

**NOVIEMBRE 17 - 23 DE 2013**

<b>HORA \ DIA</b>	<b>17/11/2013</b>	<b>18/11/2013</b>	<b>19/11/2013</b>	<b>20/11/2013</b>	<b>21/11/2013</b>	<b>22/11/2013</b>	<b>23/11/2013</b>	<b>24/11/2013</b>
00:00 a 01:00		31	52	52	91	66	78	69
01:00 a 02:00		34	67	52	67	69	76	39
02:00 a 03:00		37	93	67	41	67	63	56
03:00 a 04:00		54	72	51	64	50	82	31
04:00 a 05:00		67	119	78	65	72	68	54
05:00 a 06:00		81	82	101	115	77	93	81
06:00 a 07:00	100	155	91	114	125	122	111	
07:00 a 08:00	104	151	110	132	101	154	116	
08:00 a 09:00	107	130	111	129	121	103	152	
09:00 a 10:00	167	131	118	117	133	124	139	
10:00 a 11:00	167	154	117	116	118	130	131	
11:00 a 12:00	144	179	106	109	118	108	139	
12:00 a 13:00	123	117	107	103	142	139	129	
13:00 a 14:00	152	132	120	132	124	131	123	
14:00 a 15:00	154	159	125	136	123	130	173	
15:00 a 16:00	167	195	58	144	171	149	136	
16:00 a 17:00	181	202	54	150	178	157	187	
17:00 a 18:00	186	187	175	132	150	160	185	
18:00 a 19:00	157	131	139	183	124	174	186	
19:00 a 20:00	114	149	121	169	133	173	179	
20:00 a 21:00	94	113	78	108	135	152	143	
21:00 a 22:00	96	88	0	93	89	132	86	
22:00 a 23:00	50	75	135	80	101	106	70	
23:00 a 24:00	46	82	199	74	84	107	80	
<b>TOTALES</b>	<b>2,309</b>	<b>2,834</b>	<b>2,449</b>	<b>2,622</b>	<b>2,713</b>	<b>2,852</b>	<b>2,925</b>	<b>330</b>

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Tarapacá II

**ESTACIÓN DE RECAUDO DE PEAJE:** TARAPACÁ II

**FECHA:** 24 DE MAYO DE 2013

**HORA:** 17:30:02 - 18:31:55

No.	HORA		TIEMPO	CATEGORÍAS (Vehículos)					TOTAL
	Inicial	Final	Segundos	1	2	3	4	5	
1	17:30:02	17:32:36	154	10					10
2	17:33:14	17:34:57	103	6	1				7
3	17:35:38	17:40:10	272	12	3				15
4	17:40:15	17:41:26	71	3					3
5	17:41:43	17:41:52	9	1					1
6	17:45:38	17:49:22	224	9	4				13
7	17:50:30	17:53:48	198	9	2				11
8	17:54:08	17:54:16	8	1					1
9	17:54:33	17:55:01	28	1					1
10	17:55:33	17:57:44	131	7	2				9
11	17:58:33	17:58:57	24	1	1				2
12	17:59:09	17:59:38	29	2					2
13	18:00:22	18:00:33	11	1					1
14	18:00:54	18:02:11	77	5					5
15	18:02:23	18:05:15	172	6	1				7
16	18:05:40	18:06:11	31	2					2
17	18:06:43	18:08:09	86	6					6
18	18:08:39	18:12:30	231	12					12
19	18:12:31	18:14:32	121	4	2				6
20	18:15:46	18:16:17	31		1				1
21	18:17:18	18:21:12	234	10	1			1	12
22	18:22:45	18:23:59	74	3				1	4
23	18:24:48	18:31:55	427	18	4				22

Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Santágueda

**ESTACIÓN DE RECAUDO DE PEAJE:** SANTAGUEDA

**FECHA:** 15 DE SEPTIEMBRE DE 2013

**HORA:** 16:30:13 - 17:32:27

No.	HORA		TIEMPO	CATEGORÍAS (Vehículos)					TOTAL
	Inicial	Final	Segundos	1	2	3	4	5	
1	16:30:13	16:37:40	447	14	7	1		3	25
2	16:37:40	16:38:02	22		1				1
3	16:38:13	16:38:34	21		1				1
4	16:38:53	16:39:41	48	3	1				4
5	16:40:53	16:42:26	93	2	3				5
6	16:43:10	16:43:22	12		1				1
7	16:44:51	16:45:25	34	1					1
8	16:46:09	16:54:09	480	11	9	1		2	23
9	16:54:17	16:57:00	163	4	1			1	6
10	16:57:08	16:57:32	24	1					1
11	16:57:47	16:58:01	14	1					1
12	16:58:01	16:58:16	15	1					1
13	17:00:58	17:03:20	142	2	4	1		1	8
14	17:03:30	17:04:33	63	1				1	2
15	17:04:45	17:05:08	23		1				1
16	17:05:13	17:05:28	15	1					1
17	17:05:47	17:10:08	261	5	5		1	1	12
18	17:10:24	17:10:48	24		2				2
19	17:11:01	17:11:24	23		1				1
20	17:13:57	17:14:04	7	1					1
21	17:14:18	17:28:01	823	13	13	2	3	6	37
22	17:28:58	17:29:13	15	1					1
23	17:29:28	17:32:27	179	2	6		1		9

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 9. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Vanguardia

**ESTACIÓN DE RECAUDO DE PEAJE:** VANGUARDIA

**FECHA :** 24 DE MAYO DE 2013

**HORA:** 7:15:02 - 8:15:02

No.	HORA		TIEMPO	CATEGORÍAS (Vehículos)					TOTAL
	Inicial	Final	Segundos	1	2	3	4	5	
1	07:15:02	07:42:20	1,638	136	8		1	4	149
2	07:42:58	07:46:48	230	19	2				21
3	07:54:10	07:54:35	25		2				2
4	07:54:39	07:56:16	97	8					8
5	07:56:25	07:58:23	118	8					8
6	07:58:16	07:58:27	11	1					1
7	07:58:33	07:58:43	10	1					1
8	07:58:44	07:58:56	12	2					2
9	08:00:00	08:00:24	24	2					2
10	08:00:23	08:01:23	60				4		4
11	08:00:56	08:01:14	18	1	1				2
12	08:01:29	08:01:47	18	2					2
13	08:02:22	08:02:53	31	3					3
14	08:03:06	08:03:13	7	1					1
15	08:03:09	08:03:19	10	1					1
16	08:03:20	08:03:33	13	1					1
17	08:03:30	08:03:39	9	1					1
18	08:03:35	08:03:56	21	2					2
19	08:03:46	08:03:57	11	1					1
20	08:04:06	08:04:20	14	2					2
21	08:04:32	08:04:46	14	1					1
22	08:04:40	08:04:50	10	1					1
23	08:05:00	08:05:09	9	1					1
24	08:05:13	08:05:21	8	1					1
25	08:05:37	08:06:05	28	1				2	3
26	08:06:40	08:06:51	11	1					1
27	08:07:01	08:07:12	11	1					1
28	08:07:12	08:07:20	8	1					1
29	08:08:08	08:08:17	9	1					1
30	08:08:56	08:09:09	13	2					2
31	08:09:10	08:09:20	10	1					1
32	08:09:15	08:09:25	10	1					1
33	08:09:32	08:09:43	11	1					1
34	08:09:26	08:09:47	21					1	1
35	08:09:03	08:09:13	10	1					1
36	08:10:44	08:11:02	18	1				1	2
37	08:11:10	08:11:42	32	3					3
38	08:11:35	08:11:45	10	1					1
39	08:12:00	08:12:34	34	3					3
40	08:12:25	08:12:49	24	1	1				2
41	08:13:05	08:13:15	10	1					1
42	08:13:51	08:14:08	17	1	1				2
43	08:14:34	08:15:02	28	3					3

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Los Cueros

**ESTACIÓN DE RECAUDO DE PEAJE:** LOS CUROS

**FECHA:** 20 DE MAYO DE 2013

**HORA:** 07:00:21 - 07:59:35

No.	HORA		TIEMPO	CATEGORÍAS (Vehículos)					TOTAL
	Inicial	Final	Segundos	1	2	3	4	5	
1	07:00:21	07:03:50	209	2	3	2		1	8
2	07:04:24	07:04:51	27	1	2				3
3	07:05:22	07:11:03	341	3	9	1	3	1	17
4	07:11:52	07:12:41	49	1	2			1	4
5	07:13:17	07:13:31	14		1				1
6	07:14:30	07:14:44	14			1			1
7	07:17:40	07:18:02	22	1				1	2
8	07:20:26	07:20:57	31		1	1			2
9	07:20:46	07:20:58	12		1				1
10	07:21:22	07:21:31	9	1					1
11	07:24:01	07:24:11	10	1					1
12	07:24:20	07:24:31	11	1					1
13	07:24:38	07:24:46	8	1					1
14	07:25:17	07:31:06	349	6	10	1		5	22
15	07:31:07	07:31:17	10	1					1
16	07:32:13	07:32:21	8					1	1
17	07:32:32	07:32:40	8	1					1
18	07:32:40	07:32:53	13		1				1
19	07:33:14	07:33:26	12		1				1
20	07:34:08	07:34:53	45		1	1			2
21	07:44:50	07:44:59	9					1	1
22	07:46:06	07:46:31	25	1		1			2
23	07:47:54	07:48:04	10	1					1
24	07:48:56	07:58:43	587	13	12			8	33
25	07:58:53	07:59:35	42			1		1	2

Fuente: Elaboración propia

Anexo 11. Aforo por Pelotones en Hora de Máxima Demanda - Saboyá

ESTACIÓN DE RECAUDO DE PEAJE: SABOYÁ

FECHA : 18 DE NOVIEMBRE DE 2013

HORA: 16:15:36 - 17:15:10

No.	HORA		TIEMPO	CATEGORÍAS (Vehículos)					
	Inicial	Final	Segundos	1	2	3	4	5	TOTAL
1	16:15:36	16:15:53	17	2					2
2	16:17:42	16:17:57	15	2					2
3	16:18:36	16:18:56	20					1	1
4	16:20:09	16:20:16	7	1					1
5	16:26:13	16:26:26	13	1					1
6	16:26:50	16:27:01	11	1					1
7	16:27:49	16:27:57	8	1					1
8	16:28:59	16:29:05	6	1					1
9	16:29:09	16:29:18	9		1				1
10	16:30:32	16:30:43	11		1				1
11	16:32:28	16:32:43	15		1				1
12	16:33:00	16:33:21	21					1	1
13	16:34:32	16:34:41	9	1					1
14	16:38:40	16:38:49	9		1				1
15	16:39:38	16:40:01	23	1		1			2
16	16:40:57	16:41:12	15	1					1
17	16:41:26	16:41:34	8	1					1
18	16:46:42	16:47:53	71				1	2	3
19	16:48:23	16:48:33	10		1				1
20	16:49:08	16:49:19	11	1					1
21	16:49:23	16:49:35	12		1				1
22	16:58:06	16:58:19	13	1					1
23	16:59:50	16:59:59	9	1					1
24	17:02:12	17:02:22	10	1					1
25	17:04:15	17:04:29	14	1					1
26	17:06:38	17:06:46	8	1					1
27	17:09:52	17:10:25	33	1	1				2
28	17:11:40	17:11:52	12	1					1
29	17:12:29	17:12:40	11	1					1
30	17:12:41	17:12:50	9	1					1
31	17:13:12	17:13:26	14		1				1
32	17:14:11	17:14:20	9		1				1
33	17:14:49	17:15:10	21					1	1

Fuente: Elaboración propia