

MODELOS DE TEORÍAS DE COLAS PARA EL ANÁLISIS EN LOS TIEMPOS DE
ATENCIÓN EN PARQUEADEROS DE CENTROS COMERCIALES
DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA

DEISY SARAI LEDESMA SULBARÁN

UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
BARRANQUILLA – ATLANTICO
2018

MODELOS DE TEORÍAS DE COLAS PARA EL ANÁLISIS EN LOS TIEMPOS DE
ATENCIÓN EN PARQUEADEROS DE CENTROS COMERCIALES
DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA.

DEISY SARAI LEDESMA SULBARÁN

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO INDUSTRIAL

ASESOR:

IVAN SERRANO ARRIETA

CO-ASESOR:

RAFAEL ROJAS MILLAN

BARRANQUILLA - ATLÁNTICO

2018

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Universidad de la Costa
para optar al título de Ingeniero Industrial

Firma jurado

Firma jurado

Barranquilla, Octubre 11 de 2018

Agradecimientos

A mi querido Dios por proveerme de sabiduría e inteligencia y permitirme llegar hasta aquí.

A mis padres y hermanas por todo el apoyo que me han brindado, en especial este año 2018.

A Gladys por sus sencillos pero valiosos aportes en esta investigación.

A mis asesores, Ivan Serrano y Rafael Rojas por ayudarme en esta travesía por el mundo de la investigación.

Dedicatoria

Al Ingeniero de ingenieros, quien con su singular sabiduría e inteligencia llevó a cabo los proyectos más ambiciosos que ningún otro podría realizar jamás y quien aunque manteniéndose ocupado todo el tiempo no vacila en escucharme y ayudarme.

Mi querido Dios.

Resumen

En el presente trabajo de grado se realizó un análisis del sistema de colas en el acceso al parqueadero del Centro Comercial Portal del Prado, basado en los análisis matemáticos de Teoría de Colas, con el fin de evaluar si el sistema satisfacía la demanda generada y proponer mejoras de acuerdo a las conclusiones matemáticas arrojadas por el modelo. Para su desarrollo fue necesario realizar un estudio de campos dando un enfoque cuantitativo y experimental a la investigación. El modelo demuestra que el número óptimo de servidores para el acceso al parqueadero por la calle 53 es de cuatro, frente a dos servidores que se utilizan en la actualidad; así mismo, el número óptimo de servidores para el acceso al parqueadero por la carrera 50 es de tres, frente a dos servidores que se utilizan en la actualidad. Los resultados arrojados por el modelo permitieron concluir que aunque el sistema presenta un funcionamiento aceptable, tiene posibilidades de mejora, lo que permitiría reducir aún más los tiempos de espera en sus líneas de acceso al parqueadero. Así mismo se pudo concluir que la metodología de modelación utilizada fue la adecuada para el análisis de estos escenarios y que el modelo que se usó (Modelo MMK) describe acertadamente el tipo de situaciones estudiado.

Esta investigación servirá al público interesado como guía y consulta para desarrollar sus propios estudios. Así mismo, servirá como metodología para el desarrollo de la sección Análisis de Colas y Operación Interna de los EDAU o ET, necesarios para adquirir la licencia urbanística en la ciudad de Barranquilla.

Palabras clave: Teoría de colas, líneas de espera, Modelo MMK, Estudio de Demanda y Atención de Usuarios (EDAU), Estudios de Tránsito (ET)

Abstract

In the present work of degree an analysis of the system of tails was carried out in the access to the parking of the Portal del Prado Shopping Center, based on the mathematical analysis of Theory of Tails, with the purpose of evaluating if the system satisfied the generated demand and proposing improvements according to the mathematical conclusions thrown by the model. For its development it was necessary to carry out a field study giving a quantitative and experimental approach to research. The model shows that the optimum number of servers for access to the parking lot on Calle 53 is four, compared to two servers that are currently used; Likewise, the optimal number of servers for access to the parking lot by race 50 is three, compared to two servers that are currently used. The results obtained by the model allowed to conclude that although the system presents an acceptable functioning, it has possibilities of improvement, which would allow to reduce even more the waiting times in its lines of access to the parking lot. It was also possible to conclude that the modeling methodology used was adequate for the analysis of these scenarios and that the model that was used (Model MMK) aptly describes the type of situations studied.

This research will serve the interested public as a guide and consultation to develop their own studies. Likewise, it will serve as a methodology for the development of the Queue Analysis and Internal Operation section of the EDAU or ET, necessary to acquire the urban license in the city of Barranquilla.

Keywords: Queue Theory, waiting lines, MMK Model, Demand Study and User Attention, Transit Studies

Contenido

Introducción	11
1. Planteamiento del Problema	13
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos Específicos	15
3. Antecedentes.....	16
4. Justificación	17
5. Metodología.....	19
6. Marco Teórico	21
6.1 Generalidades	21
6.2 Elementos de un sistema de colas	22
6.3 La distribución de Poisson	25
6.3 La distribución exponencial	26
6.4 Notación Kendall.....	27
6.5 Modelo MMK	28
7. Marco normativo	30
8. Descripción Caso Aplicado	33
8.1 Datos Recopilados Acceso Calle 53.....	37
8.1.1 Análisis Sistema de Colas.....	41
8.2 Datos Recopilados Acceso Cra 50	46
8.2.1 Análisis Sistema de Colas.....	51
8.3 Descripción y Análisis de las Operaciones de Cargue y Descargue de Mercancías	56
8.4 Descripción y Análisis del Manejo Interno del Servicio de Taxis.....	57
9. Conclusión.....	60
Referencias.....	62
Anexos	64

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1. Ingreso de Vehículos Calle 53.....	37
Tabla 2. Tiempos de Atención Calle 53.....	38
Tabla 3. Datos Calle 53.....	41
Tabla 4. Resultados $P(0)$ Calle 53.....	41
Tabla 5. Resultados $P(0) / E(w)$ Calle 53	42
Tabla 6. Resultados $P(0) / E(w) / E(v)$ Calle 53	44
Tabla 7. Resultados $P(n)$ Calle 53.....	45
Tabla 8. Ingreso de Vehículos Cra. 50.....	47
Tabla 9. Tiempos de Atención Cra. 50	48
Tabla 10. Datos Cra. 50	51
Tabla 11. Resultados $P(0)$ Cra. 50	51
Tabla 12. Resultados $P(0) / E(w)$ Cra. 50	52
Tabla 13. Resultados $P(0) / E(w) / E(v)$ Cra. 50.....	53
Tabla 14. Resultados $P(n)$ Cra. 50	54

Figuras

Figura 1. Sistema de Colas básico.	22
Figura 2. Sistema de Colas Varias Líneas, Múltiples Servidores.....	25
Figura 3. Vista Satelital Centro Comercial Portal del Prado.....	33
Figura 4. Vista circundante al Centro Comercial Portal del Prado.....	34

Figura 5. Acceso y Salida Zona de Parquaderos Calle 53	35
Figura 6. Vista frontal – Acceso y Salida Zona de Parquaderos Calle 53	35
Figura 7. Acceso y Salida Zona de Parquaderos Cra. 50	36
Figura 8. Vista más Cercana del Acceso y Salida Zona de Parquaderos Cra 50	36
Figura 9. Acceso a la Zona de Descargue de Mercancías Cra. 50	57
Figura 10. Vista Aérea Bahía o Rampa para Taxis Calle 53	59
Figura 11. Bahía de Taxis Esquina Cra. 50 – Cll 53.....	59

Anexos

Anexo A. Cuestionario de Preguntas. Operación de Cargue y Descargue Centro Comercial Portal del Prado	64
Anexo B. Cuestionario de Preguntas. Servicio de Taxis en Centros Comerciales	65

Introducción

Las colas o líneas de espera son fenómenos presentes en la mayoría de las actividades diarias y son originados cuando la demanda supera la oferta. Si se examina el entorno es posible encontrar líneas de espera en todas partes, por ejemplo, la opción de llamada en espera en los teléfonos fijos y móviles, el uso de los baños públicos o incluso en casa, las filas para recargar la tarjeta para el uso de los sistemas de transporte masivos de la ciudad, en los bancos, en las tiendas, supermercados, aeropuertos, intersecciones semaforizadas, etc. Como se puede observar, las actividades de la vida diaria se ven continuamente afectadas por modelos de filas de espera; es por ello que su estudio se convierte en una necesidad para mejorar los sistemas en los que se presenten líneas de espera y optimizar sus tiempos y costos. Además de los ejemplos mencionados anteriormente, otro de los lugares donde se presentan líneas de espera es en los accesos a los parqueaderos de centros comerciales, y precisamente éste será el foco de estudio del presente trabajo de grado.

En los últimos años se ha visto un incremento de centros comerciales en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana. Hoy en día existen más de 20 centros comerciales abiertos al público, además de otros en proceso de construcción, lo cual es positivo para la economía de la ciudad. Sin embargo, es importante tener en cuenta el impacto que estos centros de comercio generan sobre su entorno y específicamente sobre las vías públicas, ya que al ofrecer múltiples opciones comerciales, de servicio, esparcimiento y recreación, atraen a un gran conglomerado de personas, aumentando exponencialmente el tráfico en estos sectores y evidentemente formando filas en sus zonas de accesos a parqueaderos. A lugares de este tipo, con gran capacidad de atraer personas se les denomina Polos Generadores de Viajes, los cuales por generar una cantidad significativa de viajes, tienen la necesidad de habilitar espacios de estacionamiento, además de

zonas para el cargue y descargue de mercancías y lugares de embarque y desembarque de personas. Si no existe un buen diseño en sus accesos, las líneas de espera terminan impactando las vías públicas de la ciudad, generando trancones en las mismas. Pero, ¿cómo pueden diseñarse estos accesos de tal manera que no generen impactos a las vías públicas, o por lo menos que el impacto sea el menor posible? Para resolver el planteamiento anterior existe un estudio matemático denominado Teoría de Colas, el cual consiste en el estudio de las colas dentro de un sistema y se basa en una serie de modelos matemáticos que describen sistemas de líneas de espera, los cuales buscan hallar el mejor desempeño en términos de tiempos de espera y costes sin que el sistema colapse. En la actualidad, la normatividad que regula la construcción de Polos Generadores de Viajes, exige estudios utilizando teoría de colas para garantizar el menor impacto en las vías públicas.

En el presente trabajo se analizará el desempeño actual de las líneas de espera en los accesos al parqueadero del Centro Comercial Portal del Prado para verificar que tan eficiente es el sistema; se revisará la normatividad vigente y se dará solución a la pregunta problema formulada: ¿Cómo se puede mejorar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo de los centros comerciales?

El presente estudio servirá de guía a los interesados en aplicar estos estudios a otros centros comerciales o en general a PGV; así mismo servirá a los interesados en realizar Estudios de Demanda y Atención de Usuarios (EDAU) o Estudios de Tránsito (ET) para desarrollar la sección Análisis de Cola y Operación Interna; estudio que debe presentarse ante la Autoridad de Tránsito Distrital y obtener su aprobación previo al trámite y otorgamiento de la licencia urbanística.

1. Planteamiento del Problema

Con la proliferación de centros comerciales en Barranquilla, la movilidad en algunos sectores de la ciudad se ha visto afectada, sobretodo en horas pico o de mayor afluencia vehicular. Este fenómeno se da por la atracción de viajes que genera el centro comercial sumado al tránsito regular del sector, haciendo que el nivel de servicio de las vías públicas disminuya. Esta situación ha provocado que las autoridades establezcan normas que deben seguir los centros comerciales y en general los polos generadores de viaje para mitigar el impacto en el tránsito del sector, haciendo que el establecimiento garantice que puede, no sólo acumular vehículos en su predio, sino hacerlo sin generar desbordamiento, hacia las vías públicas, de las líneas de espera de los vehículos que desean ingresar al establecimiento. Sin embargo, y a pesar de los esfuerzos de las autoridades, muchos centros comerciales siguen presentando problemas en sus zonas de acceso al parqueadero, formándose colas que impactan la vía.

Para evitar estos colapsos es importante que los estudios para el diseño de los accesos a la zona de parqueo se realicen de manera cuidadosa, haciendo uso de las herramientas ingenieriles que se adecuen a la realidad de la situación. Es por ello que surge la siguiente pregunta: ¿Cómo se puede mejorar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo de los centros comerciales? Para dar respuesta a esta pregunta es preciso revisar la normatividad actual de la ciudad de Barranquilla que regule los polos generadores de viaje, así como revisar las herramientas que dispone la ingeniería para dar solución a esta problemática. Es en este punto surge el siguiente interrogante: ¿Cuál metodología de modelación es la más adecuada?

Por consiguiente es preciso realizar una investigación de campo y de tipo experimental para caracterizar el fenómeno presentado, modelar adecuadamente las líneas de espera, visualizar

su comportamiento de acuerdo a diferentes diseños de la zona de acceso al parqueadero y hallar la solución óptima al interrogante inicialmente planteado.

Con la presente investigación se podrá desarrollar una metodología para los Estudios de Demanda y Atención de Usuarios exigidos por las autoridades de la ciudad para la construcción de polos generadores de viaje.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Modelar las líneas de espera de los accesos a la zona de parqueo del Centro Comercial Portal del Prado de la ciudad de Barranquilla haciendo uso de teoría de colas con el fin de determinar si el sistema utilizado es el adecuado de acuerdo a la demanda existente. Así mismo, se pretende aportar a la comunidad interesada un trabajo de guía y consulta para aplicar estos estudios a otros PGV, así como desarrollar la sección Análisis de Cola y Operación Interna en los Estudios de Demanda y Atención de Usuarios (EDAU) y en los Estudios de Tránsito (ET). Con el presente trabajo se dará respuesta a la pregunta problema ¿Cómo se puede mejorar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo de los centros comerciales?

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la zona de acceso de vehículos al Centro Comercial Portal del Prado de la ciudad de Barranquilla
- Identificar el modelo adecuado de teoría de colas aplicable al sistema de acceso a la zona de parqueo del Centro Comercial Portal del Prado de la ciudad de Barranquilla
- Evaluar el desempeño actual del sistema de acceso a la zona de parqueo del Centro Comercial Portal del Prado de la ciudad de Barranquilla

3. Antecedentes

Mondejar Lorenzo, 2015, Estudio de generación de viajes, estacionamientos e impacto de tránsito en un centro comercial; estudio realizado en el centro comercial Nuevo centro Shopping en la ciudad de Córdoba – Argentina. La recopilación de datos se realizó a través de censos y encuestas, datos que fueron procesados a través de modelos matemáticos. Dentro de los resultados obtenidos, el resultado de interés para la presente investigación está descrito en el capítulo 5, Demanda de estacionamiento, en donde realizaron un análisis de la congestión en el ingreso a la zona de estacionamiento y se determinó que en promedio la tasa de servicio debe ser menor a 10 segundos para evitar congestiones durante el ingreso y se concluyó que el centro comercial está generando un impacto negativo en el tránsito, produciendo una disminución en el nivel de servicio de las vías públicas del sector.

4. Justificación

La presente investigación se presenta dentro de un marco temporal en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana en donde la construcción de nuevos centros comerciales ha tenido un gran auge, y ya que la construcción es considerada un sector de gran importancia para el progreso económico de un país (...) (Ayala, Murillo, Rojasl. Leal, Cervantes & Coll, 2018, p 43), es posible afirmar que nuestra ciudad está experimentando un tiempo de bonanza económica. Sin embargo, este tipo de construcciones trae consigo desafíos que no deben ignorarse. Uno de ellos tienen que ver con el impacto que generan en el comportamiento del tránsito del sector circundante, ya que un centro comercial tiene la capacidad de convertir una zona tranquila y de baja circulación vehicular en una zona activa y con problemas de movilidad. Esta situación es evidente en zonas en la ciudad de Barranquilla donde actualmente se encuentran ubicados centros comerciales, los cuales debido a una mala planificación y diseño de sus zonas de accesos tiene colapsadas las vías públicas del sector, sobre todo en las horas de mayor afluencia vehicular. Es por esto que surge la necesidad de realizar una investigación que aborde esta problemática y sirva de referencia para el diseño de los accesos a los parqueaderos a futuras construcciones de centros comerciales pero también pueda servir de guía para optimizar los accesos de los centros comerciales que se encuentran ya operando. Existen modelos matemáticos útiles en el diseño de los accesos a los parqueaderos de centros comerciales, los cuales permiten identificar el diseño óptimo con las cantidades de servidores necesarios para un menor represamiento de vehículos. Debido al desarrollo paso a paso del modelo matemático utilizado, los interesados podrán utilizar la presente investigación como material de consulta para el desarrollo de sus propios trabajos.

Por otro lado, esta investigación pretende servir de referencia y consulta para la elaboración de la sección “Análisis de colas y operación interna” de los Estudios de Tránsito (ET) y Estudios de Demanda y Atención de Usuarios (EDAU), requisito indispensable para obtener una licencia urbanística en el Distrito de Barranquilla para la construcción de centros que se consideren Polos Generadores de Viajes.

5. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo y dar solución a la pregunta problema ¿Cómo se puede mejorar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo de los centros comerciales?, surgió otro interrogante cuya respuesta permitiría sentar las bases de la investigación. Dicho interrogante fue el siguiente: ¿Cuál metodología de modelación es la más adecuada para mejorar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo de un centro comercial?

Fue necesario entonces desarrollar una investigación en un marco de estudios de campo debido a la necesidad de recopilar información mediante el contacto directo con el objeto de estudio, este enfoque le dio un corte cuantitativo a la investigación.

Los instrumentos utilizados para la recopilación de la información fueron la observación y la entrevista detalladas a continuación:

A través de la observación se tomaron los datos iniciales que permitirían la aplicación y el desarrollo del modelo matemático propuesto en el Marco Teórico. Durante la observación se hizo necesario el uso del cronómetro como instrumento para la medición del tiempo, dato requerido por el modelo matemático. Los datos fueron organizados en tablas para su un mejor análisis y procesamiento de la información.

Una vez organizada la información se obtuvieron datos secundarios necesarios para desarrollar el modelo matemático con el que fue posible visualizar diferentes escenarios de acuerdo a la configuración del sistema de acceso en diferentes números de servidores y aportar conclusiones objetivas. Por esta razón esta investigación es de tipo experimental.

Por último se utilizó otro instrumento de recopilación de información el cual fue la entrevista para el desarrollo de los capítulos Descripción y Análisis del Manejo Interno del Servicio de Taxis y Descripción y Análisis de las Operaciones de Cargue y Descargue de Mercancías, entrevistas que fueron realizadas directamente a empleados del centro comercial y a funcionarios de las empresas de servicio de taxi autorizadas por el centro comercial. La información aportada sirvió de guía para el desarrollo de la descripción de estas operaciones.

Otro aspecto importante para el desarrollo de este trabajo investigativo fue la consulta normativa que se realizó para delimitar los resultados y conclusiones de acuerdo a los parámetros establecidos por las autoridades y darle sustento y soporte.

Toda la investigación, los datos recopilados, el desarrollo del modelo y las conclusiones dadas se encuentran debidamente documentados en el presente trabajo y fueron realizadas en el Centro Comercial Portal del Prado.

6. Marco Teórico

6.1 Generalidades

ERLANG, Agner Krarup fue un matemático, estadístico e ingeniero danés (1878- 1929) quien publicó "Soluciones a problemas importantes de la teoría de probabilidades aplicada a centrales automáticas de conmutación telefónica" y cuyo trabajo fue adoptado inmediatamente por muchas compañías telefónicas del momento. Él demostró que la distribución de Poisson se podía aplicar al tráfico telefónico aleatorio (Foro Histórico de las Telecomunicaciones, 2018). El objetivo de sus investigaciones era analizar la congestión de tráfico telefónico para cumplir la demanda incierta de servicios en el sistema telefónico de Copenhague. (Ordoñez, Jimenez, Vega, 2012). Hoy en día sus estudios son la base de la Teoría de Colas.

La Teoría de Colas es una disciplina dentro de la Investigación operativa cuyo objetivo es el estudio y análisis de situaciones en las que existen entes que demandan cierto servicio, al ser requerido por muchos entes en un momento dado, se provocan esperas (Cao, 2002). Estas esperas tienen impactos sobre los entes que demandan el servicio, impactos económicos en el caso de objetos inanimados e impactos psicológicos y económicos en el caso de las personas. La importancia de su estudio radica en que a través de ella es posible determinar los niveles óptimos de servicio de un sistema sin desmejorar su calidad, permitiendo a las compañías operar con costos más bajos garantizando un buen servicio; así mismo, y de acuerdo al caso, un buen servicio a los clientes se convierte en su fidelización y la recomendación de éste a otros.

Se considera también la teoría de colas como un análisis matemático de líneas de espera en un sistema cuyos factores principales de estudio son la capacidad que tiene el sistema sin que colapse y el tiempo de espera medio (Pérez, 2017).

Los objetivos de esta teoría se detallan a continuación:

- Identificar el nivel óptimo de capacidad del sistema que minimiza el coste global del mismo.
- Evaluar el impacto que las posibles alternativas de modificación de la capacidad del sistema tendrían en el coste total del mismo.
- Establecer un balance equilibrado (“óptimo”) entre las consideraciones cuantitativas de costes y las cualitativas de servicio.
- Hay que prestar atención al tiempo de permanencia en el sistema o en la cola: la “paciencia” de los clientes depende del tipo de servicio específico considerado y eso puede hacer que un cliente “abandone” el sistema. (Moreno, 2011, <http://invoperacioneslu.blogspot.com/p/teoria-de-colas-o-linea-de-espera.html>)

6.2 Elementos de un sistema de colas

Un sistema de cola básico se puede representar de la siguiente manera:

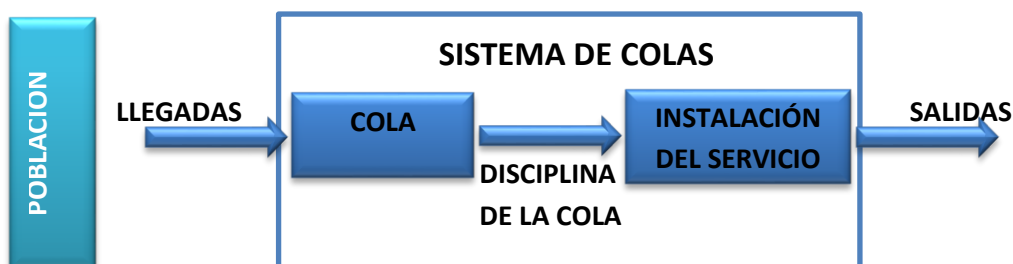


Figura 1. Sistema de Colas básico. Extraído de <http://iocontadoresuaeh.blogspot.com/2014/06/estructura-de-la-teoria-de-colas-o.html>

Los elementos que integran un sistema de colas se explican a continuación:

Población, en donde se encuentran los potenciales usuarios o clientes (sean personas u objetos) y cuyo tamaño puede ser finito o infinito. Esta distinción en el tamaño es importante ya que se utilizan diferentes ecuaciones para su solución.

La población es finita cuando consta de un grupo limitado de clientes; en este caso, al dejar el cliente su posición como miembro de la población, ésta va disminuyendo en una unidad, disminuyendo también la probabilidad que un cliente requiera un servicio. Así mismo, al ser atendido el cliente, éste regresa a la población aumentando la probabilidad que un cliente requiera un servicio. Por otro lado, la población es infinita cuando ésta tiene un tamaño suficiente en comparación con el sistema de servicio, de manera que los cambios del tamaño de la población no afectan de manera sustancial las probabilidades del sistema (Santiago, 2017)

Para fines del presente estudio el tamaño a utilizar es infinito.

Llegadas, es decir, el ingreso al sistema de colas por parte de un usuario y se establece que las llegadas pueden ser de dos tipos, determinístico o probabilístico. En el determinístico los tiempos de llegada son conocidos con exactitud (no son aleatorios) y en el probabilístico el tiempo entre llegadas sucesivas es incierto y variable.

Una hipótesis muy utilizada es la de suponer que las llegadas son independientes unas de otras y que el número de las mismas en un intervalo de tiempo dado se distribuye según una ley de Poisson o, lo que es igual, que el tiempo transcurrido entre dos llegadas consecutivas se distribuye según una ley exponencial. El número medio de clientes que acceden al sistema por unidad de tiempo recibe el nombre de tasa de llegadas. (Sarabia, 1996, p. 374)

La tasa media de llegadas se representa con la letra griega λ (lamda) o con una “q” minúscula y el tiempo medio entre llegadas es $1/\lambda$ o $1/q$.

Más adelante se ahondará en las distribuciones de Poisson y exponencial.

Cola o línea de espera, una o varias colas que pueden ser finitas o infinitas y cuyo comportamiento se rige por una disciplina que consiste en el orden de atención al usuario. Algunos tipos de disciplina son: FIFO (first in, first out) en donde se atienden a los clientes de acuerdo al orden cronológico de llegada; LIFO (last in, first out) que también se conoce como Pila en donde se atiende al que ha llegado de último; RSS (random selection of service) en donde los clientes son seleccionados de forma aleatoria de acuerdo a una prioridad pre-establecida u otro parámetro.

Para los fines de este estudio, la disciplina utilizada es FIFO.

Sistema de servicio, es el proceso de prestación del servicio a los clientes.

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. (Cao, 2002, p. 130).

El número medio de clientes atendidos por unidad de tiempo se le denomina tasa de servicio y se representa con la letra griega μ (miu) o con una “Q” mayúscula. El tiempo esperado de servicio equivale a $1/\mu$ o $1/Q$.

En estos sistemas básicos de cola, una vez que los usuarios han recibido el servicio salen del sistema sin ingresar a otro.

Existen diversos tipos de configuración de los sistemas de colas, sin embargo sólo se mostrará el que compete a este estudio:

Varias líneas, múltiples servidores:

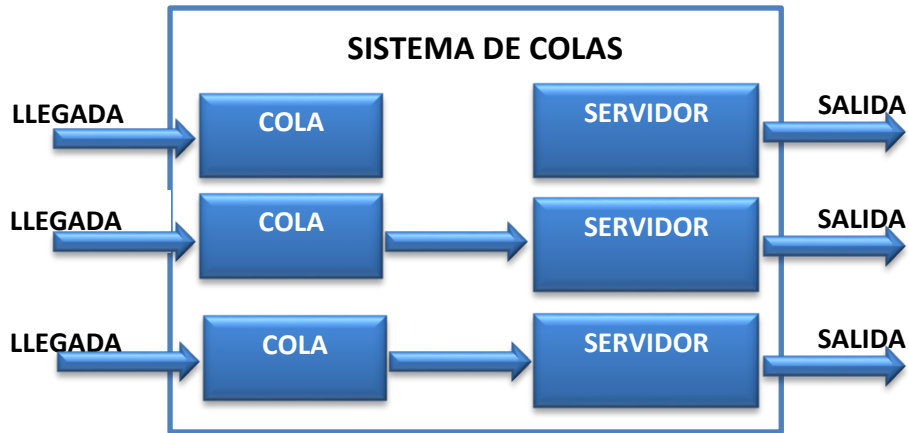


Figura 2. Sistema de Colas Varias Líneas, Múltiples Servidores. Extraído de <http://co.globedia.com/ingenieria-teoria-colas>

6.3 La distribución de Poisson

Esta distribución es muy frecuente en los problemas relacionados con la investigación operativa, sobre todo en el área de la gestión de colas. Suele describir, por ejemplo, la llegada de pacientes a un ambulatorio, las llamadas a una centralita telefónica, la llegada de coches a un túnel de lavado, el número de accidentes en un cruce, etc. Todos estos ejemplos tienen un punto en común: todos ellos pueden ser descritos por una variable aleatoria discreta que tiene valores no-negativos enteros (0,1,2,3,4...). El número de pacientes que llegan al ambulatorio en un intervalo de 15 minutos puede ser igual, a 0, 1, 2 3...

Sigamos con el ejemplo del ambulatorio. La llegada de pacientes se puede caracterizar de la forma siguiente:

1. El número medio de llegadas de los pacientes para cada intervalo de 15 minutos puede ser obtenido a través de datos históricos.

2. Si dividimos el intervalo de 15 minutos en intervalos mucho más pequeños (por ejemplo, 1 segundo), podemos afirmar que:

2.1 La probabilidad de que exactamente un único paciente llegue al ambulatorio por segundo tiene un valor muy reducido y es constante para cada intervalo de 1 segundo.

2.2 La probabilidad de que 2 o más pacientes lleguen dentro del intervalo de 1 segundo es tan pequeña que podemos decir que es igual a 0.

2.3 El número de pacientes que llegan durante el intervalo de 1 segundo es independiente de donde se sitúa este intervalo dentro del periodo de 15 minutos.

2.4 El número de pacientes que llegan en un intervalo de 1 segundo no depende las llegadas que han sucedido en otro intervalo de 1 segundo

Si al analizar un proceso de llegada este cumple estas condiciones, podemos afirmar que su distribución es de Poisson. (Serra, 2002, p. 97, 98)

6.3 La distribución exponencial

Mientras que la distribución de Poisson describe las llegadas por unidad de tiempo, la distribución exponencial estudia el tiempo entre cada una de estas llegadas. Si las llegadas son de Poisson, el tiempo entre ellas es exponencial.

Mientras que la distribución de Poisson es discreta, la distribución exponencial es continua, porque el tiempo entre llegadas no tiene por qué ser un número entero.

Esta distribución se utiliza mucho para describir el tiempo entre eventos, más específicamente, la variable aleatoria que representa el tiempo necesario para

servir a la llegada. Ejemplos típicos de esta situación son el tiempo que un médico dedica a una exploración, el tiempo de servir una medicina en una farmacia, o el tiempo de atender a una urgencia.

El uso de la distribución exponencial supone que los tiempos de servicio son aleatorios, es decir, que un tiempo de servicio determinado no depende de otro servicio realizado anteriormente, ni de la posible cola que pueda estar formándose. Otra característica de este tipo de distribuciones es que no tienen “edad”, o en otras palabras, “memoria”. Por ejemplo, supongamos que el tiempo de atención de un paciente en una sala quirúrgica sigue una distribución exponencial. Si el paciente ya lleva 5 horas siendo operado, la probabilidad de que esté una hora más es la misma que si hubiera estado 2 horas, o 10 horas o las que sea. Esto es debido a que la distribución exponencial supone que los tiempos de servicio tienen una gran variabilidad. A lo mejor el próximo paciente operado tarda 1 hora porque su cirugía era mucho más simple que la del anterior. (Serra, 2002, p. 98)

6.4 Notación Kendall

La notación de Kendall-lee sirve para caracterizar un sistema de líneas de espera en el cual todas las llegadas esperan en una sola cola hasta que está libre uno de los K servidores paralelos idénticos. Luego el primer cliente en la cola entra al servicio, y así sucesivamente. (Carolina Serna, 2011, <http://inoperaciones7.blogspot.com/2011/04/notacion-de-kendall-lee-para-los.html>)

Para definir las características de los fenómenos de colas o líneas de espera se utiliza la notación Kendall, consistente en tres valores alfanuméricos de la siguiente manera:

a / b / c

Donde “a” es la distribución del tiempo entre llegadas. Las abreviaturas de las distribuciones más usadas son: D (determinística), E_k (Erlang con segundo parámetro k), U (Uniforme), y la que se utilizará en este estudio, M (exponencial) que “designa una distribución de probabilidad de Poisson para las llegadas o distribución de probabilidad exponencial para el tiempo de servicio” (Caba, Chamorro, Fontalvo, 2011, p.113). Éstas entre muchas otras distribuciones.

La letra “b” se refiere a la distribución del tiempo de servicio y las abreviaturas de las distribuciones son las mismas que en la distribución del tiempo entre llegadas. La letra “c” es el número de estaciones de servicio.

6.5 Modelo MMK

Se describe el modelo MMK ya que éste será el utilizado para analizar el sistema de accesos al centro comercial objeto de estudio.

Modelo multicanal que supone una población de clientes infinita, una distribución de llegadas Poisson, con múltiples colas ilimitadas, una disciplina en la fila FIFO (primeras en entrar, primeras en ser servidas), una distribución de servicio exponencial.

- a. Probabilidad de tener cero vehículos en el sistema:

$$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda} \right)}$$

- b. Tiempo promedio gastado en la cola:

$$E_{(w)} = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)!(k\mu - \lambda)^2} P_0$$

c. Tiempo promedio gastado en el sistema (incluyendo tiempo de cola y servicio):

$$E_{(v)} = E_{(w)} + \frac{1}{\mu}$$

d. Probabilidad de tener n vehículos en el sistema:

$$P(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P(0) \quad \text{para } 0 \leq n < k$$

$$P(n) = \frac{1}{k! k^{n-k}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P(0) \quad \text{para } n \geq k$$

7. Marco normativo

La Alcaldía de Barranquilla en el Decreto 0519 de 2008 reglamentó la exigencia, realización y presentación de un Estudio de Tránsito (ET) o de un Estudio Demanda y Atención de Usuarios (EDAU) para el otorgamiento de la licencia urbanística a proyectos que se constituyan en Polos Generadores de Viajes.

Para entender de qué se trata esta exigencia y cuál es la relación con el presente estudio a continuación se definirán los siguientes términos: Polos Generadores de Viajes (PGV), Estudio de Tránsito (ET) y Estudio de demanda y Atención de Usuarios (EDAU).

Se consideran Polos Generadores de Viajes (PGV) a locales o instalaciones de distinta naturaleza que tienen en común el desarrollo de actividades de porte y escala capaces de ejercer gran atracción de población, producir un contingente significativo de viajes, necesitar de grandes espacios para estacionamientos, carga y descarga de mercancías, embarque y desembarque de personas, promoviendo, en consecuencia, impactos potenciales. Los centros comerciales, hipermercados, hospitales, universidades, estadios, terminales de mercancías y de transporte público, así como las áreas protegidas de tráfico de pasaje con múltiples instalaciones productoras de viajes son algunos tipos de PGV (como se citó en Red Ibero-Americana de Estudio de Polos Generadores de Viajes, 2015).

Estudio de tránsito (ET): Contiene el análisis riguroso de la situación actual del tránsito, de la demanda vehicular proyectada y de los impactos que el proyecto urbanístico genera sobre la movilidad circundante y su zona de influencia. Incluye tránsito vehicular y peatonal, análisis de colas, evaluación de cupos de parqueaderos, semaforización, análisis de puntos críticos y capacidad vehicular de la malla vial arterial principal y complementaria del área de influencia del proyecto o del uso bajo estudio (Decreto 0519, 2008, p. 3)

Estudio de demanda y atención de usuarios (EDAU): Demuestra que el espacio para la atención de la demanda vehicular, generada por el proyecto o del uso bajo estudio, garantiza la acumulación de vehículos dentro del predio y que su operación no produce colas sobre las vías públicas en las horas de más alta demanda (Decreto 0519, 2008, p. 4)

Debido a que los PGV son instalaciones que atraen y producen un gran número de viajes repercutiendo negativamente en la red vial circundante, las autoridades han establecido la realización de estudios al respecto, como son los ET y EDAU, a los interesados en obtener una licencia urbanística en el Distrito de Barranquilla. Dentro de todo el contenido que deben desarrollar los interesados, se encuentra la sección ANÁLISIS DE COLAS Y OPERACIÓN INTERNA, el cual se desglosa de la siguiente manera:

- Cuantificación y análisis de los volúmenes vehiculares totales esperados sobre los accesos y salidas
- Sistema de control de acceso vehicular propuesto, localización y cantidad de dispositivos
- Análisis de colas para la hora de máxima demanda
- Descripción y análisis de las operaciones de cargue y descargue de mercancías
- Descripción y análisis del manejo interno del servicio de taxis

En el presente trabajo se desarrollarán algunos de los anteriores puntos que de acuerdo a la naturaleza y objetivo de la presente investigación puedan abordarse.

Otro aspecto importante a considerar son las calzadas alternas o de servicio para los accesos a los parqueaderos reglamentados en el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Barranquilla. En éste se establece que las agrupaciones comerciales además de cualquier otro tipo de edificación con alto flujo vehicular, deberán disponer de estas calzadas para garantizar

los accesos y salidas de las edificaciones, ya que no se permiten accesos y/o salidas directas de parqueaderos a las vías públicas. Estas calzadas deberán tener la longitud de cola establecido por el ET o EDAU (Decreto 0212, 2014, p. 310)

Teniendo en cuenta este marco normativo se puede precisar la relevancia de esta investigación ya que servirá a la comunidad interesada como material de consulta para el desarrollo del Análisis de Colas y Operación Interna en los ET y EDAU, así como para el rediseño de los accesos a parqueaderos en PGV ya existentes.

8. Descripción Caso Aplicado

A través de la presente investigación se pretende construir una metodología que permita evaluar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo en centros comerciales y poder satisfacer los requerimientos del decreto 0519 de 2008 en la sección 5 denominada Análisis de Cola y Operación Interna de una EDAU o ET. Por lo cual se presenta el siguiente caso desarrollado en el Centro Comercial Portal del Prado y en donde se aplica la formulación de teoría de colas.

A continuación se presentarán las características principales del centro comercial estudiado.

El Centro Comercial Portal del Prado se encuentra ubicado en la ciudad de Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, Colombia. Localizado en la calle 53 entre las carreras 46 y 50, en un sector muy popular de la ciudad. En las imágenes a continuación se puede apreciar el centro comercial a diferentes escalas.

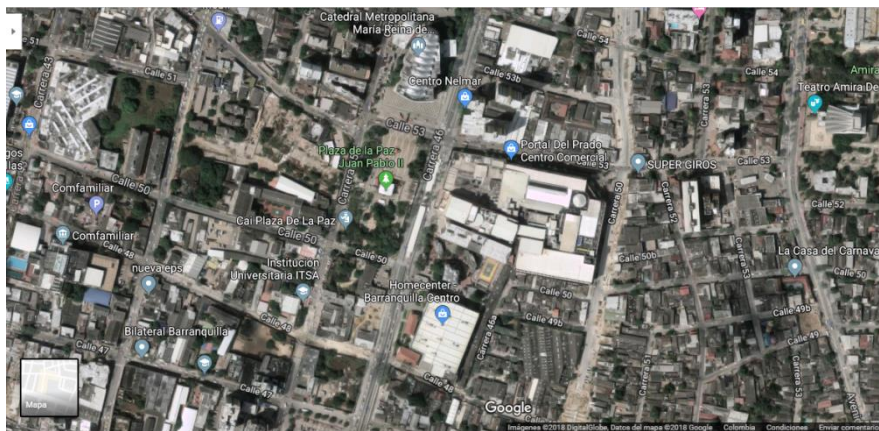


Figura 3. Vista Satelital Centro Comercial Portal del Prado. Recuperado de Google Maps

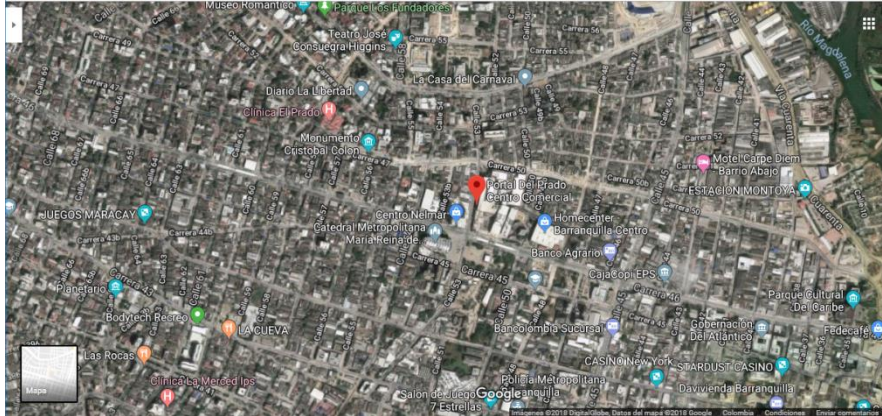


Figura 4. Vista circundante al Centro Comercial Portal del Prado. Recuperado de Google Maps

El centro comercial cuenta con un área de 70.000 m² y está distribuido en 3 pisos y un mezzanine, en los cuales se encuentran más de 150 locales y stands dedicados a la comercialización de ropa, calzado, tecnología, bisutería, servicios, casino y juegos, además de dos almacenes ancla como son Royal Films y SAO. Posee dos accesos y salidas hacia y desde los parqueaderos, uno sobre la calle 53 con carrera 46 y el otro sobre la carrera 50. Estas zonas poseen más de 600 lugares de parqueo habilitados y son independientes de la zona de carga y descarga de mercancías y de las áreas para el servicio de taxis.

La zona donde está ubicado este centro comercial es muy estratégica debido a que está rodeado de importantes lugares de la ciudad como son la Plaza de la Paz, la Catedral María Reina y el Teatro Amira de La Rosa y es muy cercano a dos importantes universidades de la ciudad, por tal motivo es un sector bastante transitado por vehículos particulares y de servicio público.

Las imágenes 3 hasta la 6 a continuación muestran los accesos y salidas de los parqueaderos.



Figura 5. Acceso y Salida Zona de Parquaderos Calle 53. Recuperado de Google Maps

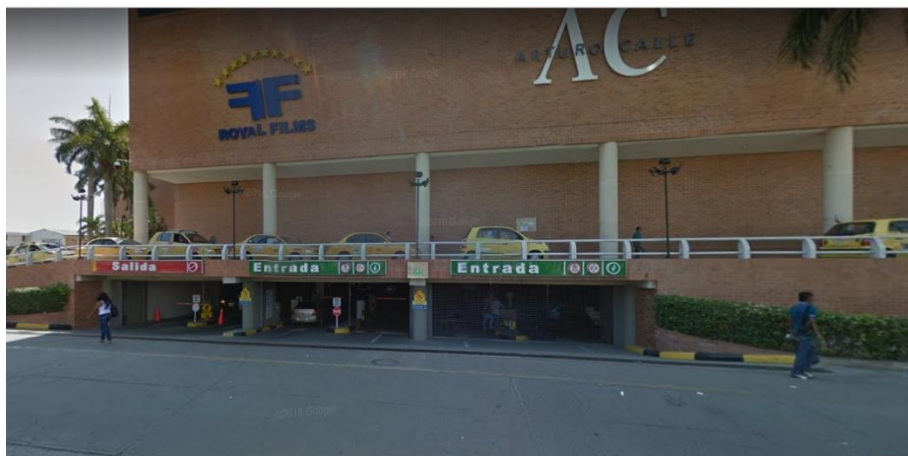


Figura 6. Vista frontal – Acceso y Salida Zona de Parquaderos Calle 53. Recuperado de Google Maps



Figura 7. Acceso y Salida Zona de Parquaderos Cra. 50. Recuperado de Google Maps



Figura 8. Vista más Cercana del Acceso y Salida Zona de Parquaderos Cra 50. Recuperado de Google Maps

A pesar que los accesos estas diseñados para que funcionen 4 servidores por acceso, sólo se encuentran habilitados dos servidores por acceso para el ingreso de vehículos.

El proceso para el ingreso de los vehículos es el siguiente: el vehículo debe acercarse a una máquina expendedora de tickets para el control de accesos, una vez proporcionado el ticket la talanquera ubicada un poco mas adelante se eleva y el vehículo puede ingresar al área de parqueo del centro comercial.

8.1 Datos Recopilados Acceso Calle 53

Se efectuó un aforo del ingreso de automóviles al parqueadero del centro comercial Portal del Prado durante varios días, entre las 05:00 p.m. y las 08:00 pm., presentándose a continuación

los siguientes datos recopilados:

Tabla 1.

Ingreso de Vehículos Calle 53

Tabla 1

Ingreso de vehículos a la zona de parqueadero
Centro Comercial Portal del Prado
Horario 5 - 8 pm

ACCESO 1 (Cll. 53)

Día: Sábado 11/11/2017					
HORAS \ MINUTOS	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 59	Total de vehículos
5:00 PM	39	40	35	40	154
6:00 PM	37	44	39	47	167
7:00 PM	37	36	34	38	145

Día: Sábado 18/11/2017					
HORAS \ MINUTOS	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	Total de vehículos
5:00 PM	47	45	44	43	179
6:00 PM	54	47	53	47	201
7:00 PM	44	40	43	45	172

Día: Domingo 12/11/2017					
HORAS \ MINUTOS	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	Total de vehículos
5:00 PM	25	27	29	30	111
6:00 PM	30	28	23	29	110
7:00 PM	18	22	20	23	83

Día: Domingo 19/11/2017					
HORAS \ MINUTOS	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	Total de vehículos
5:00 PM	24	46	34	34	138
6:00 PM	37	43	35	36	151
7:00 PM	33	38	40	32	143

Día: Martes 14/11/2017					
HORAS \ MINUTOS	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	Total de vehículos
5:00 PM	39	38	30	35	142
6:00 PM	36	40	42	36	154
7:00 PM	33	36	30	28	127

Día: Martes 21/11/2017					
HORAS \ MINUTOS	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	Total de vehículos
5:00 PM	30	28	32	38	128
6:00 PM	33	43	40	37	153
7:00 PM	30	38	32	30	130

Fuente: Elaboración propia

Para cada día se totalizó la cantidad de vehículos que ingresaron al parqueadero y se determinó que los sábados son los días de mayor demanda del servicio de parqueo en el centro comercial y específicamente entre las 6:00 y 7:00 pm. Para el sábado 18 de noviembre el total de vehículos ingresados entre las 6:00 y 7:00 pm fue de 201. La tasa media de llegadas por unidad de tiempo (λ) para el día de mayor demanda fue de 201/hora

Durante el aforo, también se tomaron los tiempos de servicio los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2.

Tiempos de atención

Tabla 2

Tiempos de atención

Centro Comercial Portal del Prado
Horario 5 - 8 pm

ACCESO 1 (Cil. 53)

DÍA: SÁBADO 11/11/2017				DÍA: DOMINGO 12/11/2017				DÍA: MARTES 14/11/2017			
	5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM
1	9,55	11,15	10,56	1	12,40	9,06	9,18	1	9,36	12,10	9,39
2	12,49	12,03	10,90	2	10,50	9,89	12,18	2	10,81	11,75	10,79
3	10,33	11,70	12,93	3	9,01	12,14	11,66	3	11,66	9,60	11,93
4	11,23	10,08	10,75	4	10,73	9,19	10,15	4	9,75	9,07	10,27
5	10,96	9,92	9,12	5	9,78	12,50	9,92	5	12,02	9,02	10,56
6	11,40	10,24	10,06	6	11,56	11,18	11,40	6	11,18	10,43	10,73
7	10,01	9,03	10,99	7	10,62	11,24	11,01	7	12,15	9,62	9,39
8	12,40	9,98	10,04	8	12,97	11,27	9,74	8	12,82	10,73	12,78
9	12,87	10,69	12,97	9	12,87	9,49	10,06	9	12,52	9,07	9,09
10	9,09	11,76	12,05	10	10,12	10,43	9,30	10	10,85	11,72	9,07
11	11,63	10,68	11,67	11	11,59	12,15	12,63	11	9,29	10,32	11,75
12	10,24	11,60	11,56	12	12,12	10,31	11,53	12	11,15	9,47	12,44
13	10,93	9,34	10,61	13	10,47	12,30	10,42	13	12,48	11,21	9,90
14	10,26	12,97	9,76	14	9,25	12,00	12,99	14	9,54	9,27	11,52
15	9,29	10,14	11,23	15	11,95	10,50	9,15	15	9,40	12,84	10,74
16	12,65	10,26	11,08	16	10,77	10,23	9,06	16	12,95	12,76	10,07
17	9,70	12,02	12,53	17	10,73	10,11	12,88	17	12,58	9,70	9,20
18	10,33	11,83	10,85	18	10,80	9,89	12,25	18	9,98	12,39	11,25
19	9,07	12,79	10,38	19	12,74	11,23	10,73	19	11,06	12,97	12,29
20	11,27	9,18	9,20	20	11,66	12,97	10,65	20	11,69	11,67	11,26
21	11,20	11,05	12,35	21	10,82	10,52	10,52	21	12,29	10,59	12,52
22	9,37	10,65	10,16	22	10,94	10,48	12,36	22	12,68	12,58	10,89
23	12,43	9,36	11,59	23	12,33	9,13	12,97	23	10,99	9,09	10,82
24	11,44	10,67	12,02	24	10,00	12,12	10,66	24	9,76	9,83	11,02
25	11,08	9,97	10,58	25	11,78	10,02	10,59	25	9,56	11,43	12,00
26	11,18	9,48	12,43	26	12,68	11,74	9,22	26	10,77	11,02	10,67
27	9,00	11,35	11,17	27	11,75	11,88	11,92	27	11,17	9,63	10,55
28	12,52	10,93	10,28	28	12,45	9,53	12,43	28	12,29	12,08	10,49
29	9,33	11,20	11,90	29	11,47	11,16	12,09	29	11,58	9,19	12,30
30	9,13	12,04	12,51	30	12,71	12,07	12,21	30	12,71	11,49	9,84
31	12,53	10,31	9,06	31	12,28	10,55	9,56	31	12,56	11,85	11,00
32	11,30	11,59	12,98	32	12,88	12,80	12,08	32	11,76	11,68	9,02
33	9,20	11,40	12,23	33	11,61	9,49	12,82	33	9,32	11,01	11,19
34	11,90	12,23	12,01	34	9,75	11,35	12,71	34	9,35	10,15	9,24
35	10,91	12,00	9,86	35	10,44	10,79	10,55	35	11,11	9,76	11,77
36	11,48	11,05	12,95	36	11,05	11,87	9,20	36	11,32	11,17	12,69
37	10,44	10,03	9,91	37	12,66	12,00	11,52	37	10,16	10,10	12,98
38	12,93	10,94	12,82	38	9,53	11,40	9,97	38	10,96	9,76	12,14
39	12,54	10,85	11,44	39	12,06	9,35	11,64	39	12,05	9,47	10,64
40	12,97	11,24	11,66	40	12,67	11,98	10,48	40	11,34	12,31	11,42
41	12,29	11,27	12,33	41	9,60	10,47	10,89	41	12,80	12,56	10,81
42	9,87	9,10	9,64	42	12,65	9,45	9,91	42	9,71	11,28	11,66
43	11,47	12,12	9,31	43	11,62	11,16	12,04	43	12,96	10,46	9,42
44	12,51	12,80	11,72	44	11,62	9,62	10,97	44	9,01	12,16	10,96
45	12,54	10,25	9,70	45	12,64	9,77	12,56	45	10,15	9,29	10,94
46	10,84	9,60	10,63	46	9,71	9,84	9,63	46	11,29	9,41	12,54
47	9,59	12,86	10,47	47	9,96	9,74	11,33	47	9,74	10,89	12,36
48	11,48	9,47	9,49	48	11,38	9,55	11,57	48	11,74	12,89	10,67
49	12,72	11,82	12,49	49	12,04	10,72	11,30	49	11,27	10,49	9,81
50	10,10	10,33	12,23	50	11,34	10,28	9,98	50	9,43	11,11	12,41

Tabla 2. Tiempos de Atención Calle 53

Tabla 2 (continuación)

Tiempos de atención

Centro Comercial Portal del Prado
Horario 5 - 8 pm

ACCESO 1 (CII. 53)

DÍA: SÁBADO 18/11/2017				DÍA: DOMINGO 19/11/2017				DÍA: MARTES 21/11/2017			
	5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM
1	10,23	11,33	11,86	1	10,05	11,09	12,41	1	12,21	12,48	12,68
2	10,65	9,81	9,05	2	10,35	10,76	9,47	2	12,66	11,40	11,56
3	10,87	10,65	9,35	3	9,87	9,68	12,73	3	12,58	11,21	9,43
4	11,75	9,65	11,87	4	9,21	11,84	9,37	4	9,70	9,48	9,71
5	11,13	10,73	10,62	5	12,86	12,10	9,09	5	9,26	10,05	10,66
6	12,12	12,98	11,46	6	10,88	12,84	9,61	6	11,84	10,96	11,35
7	11,31	11,14	12,13	7	11,21	12,34	9,94	7	10,56	9,53	10,75
8	11,74	9,41	11,57	8	10,66	12,49	10,77	8	12,26	9,84	12,65
9	10,17	9,02	11,26	9	9,56	12,42	9,34	9	10,77	12,19	12,40
10	9,98	12,10	12,71	10	11,22	12,33	11,29	10	10,08	11,40	11,83
11	9,12	9,50	9,19	11	10,06	9,04	9,37	11	9,51	11,24	12,97
12	9,28	11,01	9,24	12	10,48	10,31	11,65	12	12,35	11,61	11,29
13	9,52	12,38	11,72	13	10,44	9,22	11,01	13	9,85	12,71	9,47
14	10,88	9,21	11,38	14	11,66	10,93	12,62	14	10,43	12,35	9,08
15	10,77	9,57	11,92	15	9,17	9,76	11,18	15	10,68	12,47	11,32
16	12,53	10,15	12,37	16	9,79	11,78	9,11	16	12,67	9,54	12,80
17	12,59	11,87	12,33	17	9,38	10,82	11,22	17	9,08	12,17	12,32
18	11,18	11,48	9,34	18	10,96	10,92	9,85	18	10,22	9,27	12,93
19	12,87	9,99	9,93	19	10,29	11,75	11,61	19	9,58	10,42	11,85
20	11,04	11,19	12,31	20	9,81	11,82	9,29	20	11,70	11,24	11,28
21	10,27	9,12	11,40	21	11,21	9,39	11,06	21	12,57	11,17	9,76
22	12,52	10,87	9,63	22	12,36	9,72	9,15	22	9,66	9,85	11,48
23	12,51	9,45	12,35	23	9,18	11,78	11,60	23	9,87	10,40	9,81
24	12,88	11,65	9,41	24	11,16	12,41	10,26	24	11,64	9,81	10,02
25	12,39	10,47	9,17	25	9,30	10,62	12,30	25	10,38	10,48	9,23
26	10,23	10,80	12,83	26	11,24	11,36	10,41	26	9,40	9,26	11,48
27	9,39	11,22	11,91	27	9,04	10,55	11,48	27	11,40	10,19	12,17
28	12,03	12,88	10,51	28	10,81	9,80	10,09	28	12,54	11,01	9,34
29	9,54	12,44	10,53	29	9,22	11,64	10,70	29	9,15	11,88	12,79
30	12,59	9,10	11,99	30	12,49	10,04	12,53	30	9,74	12,19	11,28
31	9,97	9,66	12,21	31	10,68	12,12	10,92	31	11,53	11,90	11,33
32	12,02	10,39	11,40	32	12,05	9,55	10,97	32	10,97	10,15	10,08
33	11,95	10,69	11,84	33	10,70	10,42	12,94	33	10,06	10,55	10,59
34	12,11	12,81	9,82	34	9,37	10,51	9,19	34	11,55	12,95	9,43
35	9,72	11,61	10,06	35	12,01	9,23	9,05	35	12,76	9,60	9,90
36	10,13	10,97	11,51	36	9,96	11,59	11,79	36	9,55	9,50	9,32
37	9,67	10,75	9,28	37	12,85	10,37	9,98	37	9,85	11,29	12,92
38	10,65	10,85	12,11	38	12,05	10,53	9,74	38	10,12	11,02	12,41
39	9,48	10,39	11,79	39	10,80	11,14	9,34	39	9,95	11,92	12,02
40	10,68	9,02	9,01	40	9,54	9,94	10,66	40	12,11	10,85	9,71
41	12,85	9,32	9,26	41	10,07	11,23	12,02	41	9,25	11,53	11,55
42	12,98	9,75	11,86	42	10,40	11,54	9,94	42	10,31	11,44	10,70
43	12,60	11,20	10,44	43	12,39	11,34	12,80	43	12,56	9,50	12,23
44	12,91	10,58	10,30	44	11,95	9,37	12,98	44	10,24	11,51	12,54
45	10,20	9,12	10,51	45	9,49	11,30	10,25	45	10,98	9,42	9,05
46	10,69	9,19	12,11	46	9,98	12,80	12,01	46	12,26	11,99	12,10
47	9,71	10,94	12,02	47	10,34	10,48	9,36	47	10,41	9,43	11,29
48	9,89	9,81	10,09	48	10,66	11,00	11,70	48	12,00	11,33	11,37
49	11,84	10,20	12,71	49	12,28	9,41	9,11	49	9,77	11,11	10,14
50	10,73	11,68	10,93	50	9,90	11,55	10,51	50	10,76	12,25	9,69

Fuente: Elaboración propia

Debido a la extensión de la información, sólo se muestran las primeras 50 tomas de tiempo.

Analizando los datos de la Tabla 2, se determinó el promedio de atención para el día de mayor demanda de ingreso al parqueadero, es decir el sábado 18/11/2017 (Ver Tabla 1).

El tiempo promedio de atención del acceso al parqueadero fue de 10,80 segundos. La Atención promedio por hora sería:

$$\frac{1 \text{ hora}}{10,80 \frac{\text{segundos}}{\text{vehículo}}} \frac{3600 \text{ segundos}}{1 \text{ hora}} = 333 \text{ vehículos/hora}$$

Es decir que la tasa media de servicio (μ) es de 333 vehículos por hora.

8.1.1 Análisis Sistema de Colas.

Para el análisis del sistema se utilizarán las fórmulas del modelo MMK de teorías de colas el cual quiere decir que existen K servidores con llegadas tipo Poisson y tiempos de servicio exponenciales. (Ver sección Marco Teórico).

Tabla 3.

Datos Calle 53

DATOS		
λ	201	Vehículos/hora
μ	333	Vehículos/hora

a. Probabilidad de tener

cero (0) vehículos en el sistema para K servidores

Este caso es la probabilidad que no haya vehículos en cola ni en los servidores.

Tabla 4.

Resultados $P(0)$ Calle 53

$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{K-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{K!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^K \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$		
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)
0,0	1,000	
1,0	0,604	39,64%
2,0	0,182	53,63%
3,0	0,037	54,60%
4,0	0,006	54,68%
5,0	0,001	54,68%
6,0	0,000	54,68%

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el número de servidores que operaron durante los días en que se recopilaron los datos en el acceso por la Calle 53, se observa que para dos servidores la

probabilidad de tener cero (0) vehículos en el sistema es del 53,63%, lo que indica que funcionando el sistema con dos servidores, un poco más de la mitad de las veces que un usuario llegue al acceso lo encontrará vacío, permitiéndole ser atendido inmediatamente. Si se considera que un 53,63% es un valor muy alto y que por lo tanto un poco más de la mitad de las veces el sistema se encuentra ocioso, funcionando con un (1) solo servidor, el porcentaje de las veces en que se encuentre vacío el sistema se reduce a 39,64%. Así mismo muestra que si el acceso por la Calle 53 operara con cuatro (4) servidores, el sistema funcionaría en su nivel más óptimo, ya que a partir de 4 servidores los resultados para $p(0)$ permanecen constantes.

b. Tiempo promedio gastado en la cola $E(w)$

El tiempo promedio que el usuario del servicio debe esperar en la cola hasta llegar al punto de atención.

Tabla 5.

Resultados $P(0) / E(w)$ Calle 53

	$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$		$E(w) = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)! (k\mu - \lambda)^2} P_0$
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)	E(W) (s)
0,0	1,000		
1,0	0,604	39,64%	16,462
2,0	0,182	53,63%	1,083
3,0	0,037	54,60%	0,113
4,0	0,006	54,68%	0,011
5,0	0,001	54,68%	0,001
6,0	0,000	54,68%	0,000

Fuente: elaboración propia

Se había mencionado anteriormente que para reducir el tiempo ocioso del sistema, éste pudiera operar con un solo servidor, sin embargo, si el sistema trabajara de ésta manera, los vehículos tendrían que esperar en la cola 16,46 segundos aumentando la posibilidad de formarse filas de espera, las cuales y de acuerdo a la demanda a la zona de parqueo, terminarían impactando las vías públicas, por tanto no sería una opción recomendable para el acceso por la Calle 53 al parqueadero del centro comercial.

Con dos (2) servidores, como actualmente funciona, en promedio los vehículos deben esperar en la cola 1,083 segundos, lo cual es un tiempo de espera bastante bajo. Con cuatro (4) servidores el tiempo de espera se ve reducido significativamente a prácticamente no tener que esperar en cola para ser atendido.

Es importante recordar que los resultados que arroja el modelo son promediados, por tanto en la realidad puede que se presenten episodios de espera más prolongados, sin embargo, lo que se busca con el modelo es hallar los niveles más óptimos para que el sistema pueda operar de la mejor manera reduciendo significativamente los episodios de largas esperas.

c. Tiempo promedio gastado en el sistema (incluyendo tiempo de cola y servicio) $E(v)$

El tiempo promedio que el usuario del servicio debe esperar tanto en cola como siendo atendido hasta llegar al punto de atención.

Tabla 6.

Resultados P(0) / E(w) / E(v) Calle 53

$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$ $E_{(w)} = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)! (k\mu - \lambda)^2} P_0$ $E_{(v)} = E_{(w)} + \frac{1}{\mu}$				
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)	E(W) (s)	E(v) (s)
0,0	1,000			
1,0	0,604	39,64%	16,462	27,273
2,0	0,182	53,63%	1,083	11,894
3,0	0,037	54,60%	0,113	10,924
4,0	0,006	54,68%	0,011	10,822
5,0	0,001	54,68%	0,001	10,812
6,0	0,000	54,68%	0,000	10,811

Fuente: elaboración propia

Aquí se puede observar que definitivamente el sistema no puede operar con un solo servidor ya que los tiempos de espera en el sistema son muy largos y podrían hacer colapsar las vías públicas. Por otro lado, para dos (2) y cuatro (4) servidores, los tiempos de espera en sistema se reducen notablemente en menos de la mitad.

Como puede observarse, el sistema de acceso al parqueadero del C.C. Portal del Prado por la Calle 53 tiene una buena operación con posibilidades de mejora. Más allá de cuatro (4) servidores los resultados se mantienen constantes por lo que habilitar más de cuatro servidores sería un costo ocioso y no mejora los indicadores del sistema.

d. Probabilidad de tener vehículos en el sistema

Tabla 7.

Resultados P(n) Calle 53

$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$			1	2	3	4	5
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)	p(5)
0,0	1,000						
1,0	0,604	39,64%	23,93%	14,44%	8,72%	5,26%	3,18%
2,0	0,182	53,63%	32,37%	9,77%	2,95%	0,89%	0,27%
3,0	0,037	54,60%	32,95%	9,95%	2,00%	0,40%	0,08%
4,0	0,006	54,68%	33,00%	9,96%	2,00%	0,30%	0,05%
5,0	0,001	54,68%	33,01%	9,96%	2,00%	0,30%	0,04%
6,0	0,000	54,68%	33,01%	9,96%	2,00%	0,30%	0,04%

Fuente elaboración propia

Para P(n) se utilizan las siguientes fórmulas mencionadas en el capítulo Marco Teórico

$$P(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P(0) \quad \text{para } 0 \leq n < k \qquad P(n) = \frac{1}{k!k^{n-k}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P(0) \quad \text{para } n \geq k$$

Lo que muestra la *Imagen 10*. Resultados P(n), son los distintos escenarios que se pueden presentar teniendo K número de servidores, es decir que, para el caso estudiado del acceso por la Calle 53 con dos servidores, habrá 1 vehículo en el sistema el 32,37% de las veces; 2 vehículos el 9,77%, 3 vehículos 2,95% y así sucesivamente. Estos resultados son interesantes porque permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia de que el sistema tenga más o menos vehículos que la cantidad de servidores habilitados y hacer comparativas entre diferentes K.

Otra utilidad de la tabla anterior es la de evaluar la posibilidad de ser atendido inmediatamente de acuerdo a la cantidad de servidores y la probabilidad de tener que esperar; por ejemplo:

Para K=2 servidores, la probabilidad de ser atendido inmediatamente viene dada por las siguientes situaciones:

- Que el sistema se encuentre vacío, es decir $p(0)$
- Que haya un vehículo en el sistema, es decir $p(1)$

$$53,63\% + 32,37 = 86\%$$

Por lo tanto, la probabilidad de ser atendido inmediatamente es de 86% y de tener que esperar en la fila sería de 14%.

En un escenario con $K=2$ servidores, ¿cuál es la probabilidad que el sistema esté en su máxima capacidad si sólo tiene un (1) espacio en el carril de espera?

$$\text{En este caso debo sumar } p(0) + p(1) + p(2) + p(3) = 98,73\%$$

Es decir que el 1,27% de los casos el sistema colapsaría. De acuerdo a los manuales de nivel de servicio un buen indicador es que solo en el 5% de los casos sea superada la capacidad (Board, Transportation Research. 2000. Highway Capacity Manual. [aut. libro] Comité Ejecutivo TRB. Highway Capacity Manual 2000. Washington D.C. Transportation Research Board, 2000, p. 13, 23, 24 y 25), esto quiere decir que actualmente el sistema del centro comercial Portal del Prado presenta un muy buen indicador de nivel de servicio.

8.2 Datos Recopilados Acceso Cra 50

Se realizó el mismo aforo para la Cra 50 durante las mismas fechas y horarios presentándose los siguientes:

Tabla 8.

Ingreso de Vehículos Cra. 50

Tabla 3

*Ingreso de vehículos a la zona de parqueadero*Centro Comercial Portal del Prado
Horario 5 - 8 pm

ACCESO 2 (Cra. 50)

Día: Sábado 11/11/2017

HORAS	MINUTOS				No. De vehículos
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 59	
05:00 p.m.	37	31	30	33	131
06:00 p.m.	32	28	38	37	135
07:00 p.m.	29	21	34	30	114

Día: Sábado 18/11/2017

HORAS	MINUTOS				No. De vehículos
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	
05:00 p.m.	22	28	23	23	96
06:00 p.m.	35	29	34	33	131
07:00 p.m.	21	22	22	23	88

Día: Domingo 12/11/2017

HORAS	MINUTOS				No. De vehículos
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	
05:00 p.m.	23	23	25	25	96
06:00 p.m.	30	30	25	27	112
07:00 p.m.	21	19	18	21	79

Día: Domingo 19/11/2017

HORAS	MINUTOS				No. De vehículos
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	
05:00 p.m.	26	29	40	44	139
06:00 p.m.	36	35	37	37	145
07:00 p.m.	34	30	33	36	133

Día: Martes 14/11/2017

HORAS	MINUTOS				No. De vehículos
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	
05:00 p.m.	25	22	25	30	102
06:00 p.m.	32	28	32	31	123
07:00 p.m.	31	28	27	31	117

Día: Martes 21/11/2017

HORAS	MINUTOS				No. De vehículos
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	45 - 60	
05:00 p.m.	23	20	23	20	86
06:00 p.m.	18	21	20	24	83
07:00 p.m.	23	26	27	30	106

Fuente: Elaboración propia

Igualmente que en el anterior caso se totalizó la cantidad de vehículos que ingresaron al parqueadero y se determinó que el domingo 19 de noviembre fue el de mayor demanda del servicio de parqueo en el centro comercial y específicamente entre las 6:00 y 7:00 pm, con un total de 145 vehículos ingresados.

La tasa media de llegadas por unidad de tiempo (λ) en este caso es de 145/hora

A continuación se muestra la tabla de los tiempos de servicio tomados para el acceso por la Cra. 50:

Tabla 9.

Tiempos de Atención Cra. 50

Tiempos de atención

Centro Comercial Portal del Prado
Horario 5 - 8 pm

ACCESO 2 (Cra. 50)

DÍA: SÁBADO 11/11/2017				DÍA: DOMINGO 12/11/2017				DÍA: MARTES 14/11/2017			
	5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM
1	12,89	9,35	10,92	1	9,75	10,58	10,57	1	12,08	12,37	10,75
2	11,79	11,85	9,63	2	9,56	12,03	10,4	2	10,17	10,15	10,85
3	9,43	9,64	12,33	3	11,11	12,77	10,49	3	11,1	9,81	9,63
4	10,97	11,64	9,01	4	10,69	10,7	12,76	4	9,18	9,76	12,15
5	9,47	12,33	9,96	5	9,8	12,12	10,83	5	10,92	12,58	10,1
6	10,58	9,93	12,43	6	12,46	11,6	11,53	6	10,52	9,3	10,24
7	10,93	12,57	10	7	12,04	9,41	12,49	7	11,66	9,81	9,69
8	10,88	9,91	12,56	8	10,36	11,31	12,32	8	9,51	10,1	12,36
9	10,6	12,31	10,35	9	12,09	11,08	11,72	9	12,09	12,58	11,41
10	10,44	10,07	9,04	10	11,23	11,44	9,54	10	11,37	9,42	10,42
11	9,47	9,23	9,46	11	10,76	12,09	9,92	11	9,74	11,24	12,23
12	10,87	9,95	9,55	12	11,92	9,84	11,2	12	10,15	9,65	11,47
13	11,59	11,6	11,71	13	12,74	9,89	9,49	13	9,34	11,94	10,45
14	9,52	12,5	12,84	14	9,7	12,97	12,2	14	12,38	10,51	11,7
15	11,14	12	9,26	15	10,2	12,33	9,58	15	10,97	12,88	10
16	11,01	12,35	10,97	16	11,15	12,55	11,06	16	11,49	10,58	9,65
17	11,39	11,48	12,33	17	9,49	10,26	10,19	17	12,34	9,01	10,12
18	9,02	9,15	11,45	18	10,42	9,9	10,31	18	12	9,35	9,9
19	11,13	12,31	10,82	19	10,57	11,64	10,25	19	11,84	12,84	12,21
20	10,11	10,82	12,87	20	11,32	9,58	12,76	20	12,71	10,94	11,72
21	12,49	11,28	11,12	21	9,6	10	11,15	21	12,15	11,49	9,87
22	10,84	9,78	10,2	22	10,4	12,2	11,06	22	9,88	10,01	9,54
23	12,12	9,04	11,26	23	11,41	9,81	11,46	23	10,58	12,78	9,18
24	10,56	10,34	9,8	24	10,97	10,06	10,43	24	12,84	12,89	10,04
25	11,27	9,32	12,94	25	9,88	11,89	11,93	25	10,13	11,1	12,78
26	12,49	9,78	12,16	26	9,31	9,65	9,48	26	9,96	12,25	10,72
27	9,17	12,16	11,62	27	11,61	10,32	12,89	27	10,93	9,7	12,71
28	11,93	9,77	9,02	28	11,68	12,5	10,63	28	9,32	9,65	12,57
29	10,64	9,88	11,75	29	11,91	10,23	12,87	29	9,85	12,45	12,39
30	12,35	9,32	12,4	30	10,91	9,19	10,4	30	10,51	10,52	12,93
31	12,04	10,66	10,72	31	10,02	11,33	11,55	31	10,45	12,5	12,88
32	9,24	11,95	11,47	32	12,41	9,24	12,02	32	11,27	10,02	12,82
33	12,86	12,91	10,71	33	11,41	11,89	10,6	33	12,1	12,96	11,55
34	11,62	11,85	9,48	34	9,43	10,48	9,07	34	12,97	11,32	12,3
35	10,27	9,57	12,84	35	9,68	9,74	9,53	35	9,07	11,39	9,06
36	9,22	12,03	12,9	36	10,24	12,16	10,67	36	11,92	9,6	12,16
37	9,69	10,32	10,44	37	11,11	9,28	10,79	37	11,98	10,33	10,2
38	10,07	9,94	12,53	38	13	11,22	10,44	38	12,97	9,93	10,53
39	12,21	11,57	11,45	39	12,65	9,41	12,13	39	12,97	10,83	11,73
40	11,61	10,24	10,55	40	11,75	12,09	10,12	40	11,84	12,44	11,46
41	12,94	11,97	11,68	41	10,32	9,71	9,09	41	10,64	9,17	9,37
42	11,93	9,34	9,44	42	9,24	12,99	12,58	42	11,48	9,64	11,91
43	11,25	10,01	12,84	43	10,92	11,98	9,18	43	10,22	11,01	9,25
44	11,39	10,91	9,88	44	10,2	12,5	12,82	44	10,6	12,21	9,6
45	11,01	10,93	11,09	45	10,48	11,15	12,12	45	9,68	11,26	11,14
46	9,25	11,32	11,11	46	12,16	11,71	9,26	46	10,93	9,35	9,45
47	9,15	11,84	9,89	47	10,85	12,36	11,84	47	10,1	11,49	11,58
48	11,28	12,49	11,03	48	12,97	11,78	11,34	48	9,32	12,78	11,93
49	12,86	12,01	9,11	49	9,33	10,32	9,09	49	10,09	11,13	13
50	10,91	10,05	9,65	50	10,4	10,97	11,86	50	12,76	11,52	10,95

Tiempos de atención

Centro Comercial Portal del Prado
Horario 5 - 8 pm

ACCESO 2 (Cra. 50)

DÍA: SÁBADO 18/11/2017				DÍA: DOMINGO 19/11/2017				DÍA: MARTES 21/11/2017			
	5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM		5 A 6 PM	6 A 7 PM	7 A 8 PM
1	10,99	11,02	10,66	1	10,93	12,57	9,86	1	12,07	11,9	12,46
2	9,91	9,48	10,8	2	9,91	9,36	10,32	2	11,11	11,92	10,7
3	12,16	12,48	12,73	3	11,59	10,9	11,31	3	10,54	10,18	12,97
4	11,91	12,34	9,21	4	12,48	12,02	10,23	4	11,56	9,12	9,06
5	9,64	11,32	11,78	5	9,05	11,49	9,03	5	12,35	12,66	9,17
6	11,12	9,16	12,52	6	10,71	9,07	12,16	6	12,14	10,81	9,24
7	11,58	12,3	10,21	7	11,01	11,07	12,52	7	11,77	12,59	10,44
8	10,84	9,22	11,86	8	9,22	12,79	9,51	8	9,88	9,49	11,45
9	9,32	10,46	9,86	9	11,39	10,14	9,34	9	11,13	12,57	11,33
10	11,33	9,01	9,45	10	9,66	10,86	11,1	10	10,15	11,31	12,8
11	10,81	10,19	12,46	11	12,74	9,98	12,2	11	11,32	11,41	11,52
12	11,26	9,49	10,57	12	10,44	10,92	10,59	12	10,94	12,07	12,74
13	12,8	10,74	10,24	13	9,29	9,1	10,95	13	10,8	12,04	12,76
14	12,66	12,92	9,41	14	11,41	9,93	12,98	14	11,97	11,11	9,51
15	9,38	9,08	12,67	15	11,88	10,5	11,24	15	12,66	11,92	9,28
16	10,73	9,27	11,09	16	10,4	9,39	9,17	16	12,96	11,09	11,55
17	9,52	12,93	11,13	17	9,59	11,17	12,48	17	12,03	10,55	11,62
18	10,37	11,47	11,11	18	11,32	12,2	12,85	18	11,4	11,75	9,7
19	11,27	12,51	10,48	19	11,48	10,05	12,07	19	9,48	12,27	9,81
20	12,9	10,47	12,53	20	12,86	12,94	12,29	20	11,53	9,49	11,53
21	11,99	9,04	12,34	21	10,73	12,83	12,71	21	11,52	10,03	11,44
22	12,86	11,32	11,45	22	11,17	12,56	9,11	22	11,03	12,86	10,62
23	10,94	11,05	10,79	23	9,01	12,22	9,06	23	12,38	9,61	10,75
24	11,1	12,35	12,69	24	9,37	11,44	12,69	24	9,08	11,75	11,62
25	10,94	10,06	12,25	25	12,52	9,79	9,74	25	9,88	10,63	12,77
26	12,47	11,36	11,51	26	9,35	9,57	11,16	26	9,54	12,14	12,59
27	11,9	12,74	12,82	27	12,94	11,02	11,27	27	10,34	11,66	9,29
28	11,54	12,3	10,79	28	11,51	10,2	11,24	28	10,23	12,06	11,62
29	11,77	12,6	11,51	29	9,78	10,33	9,31	29	9,79	9,47	9,44
30	9,45	9,6	12,9	30	9,24	11,93	11,93	30	12,37	9,51	9,81
31	10,91	11,1	9,97	31	9,6	11,07	9,84	31	9,22	11,4	11,75
32	11,5	9,7	11,78	32	11,7	11,82	12,31	32	9,61	9,42	9,33
33	10,77	11,72	12,32	33	9,77	11,91	11,08	33	11,57	9,29	11,14
34	9,48	11,6	9,09	34	10,57	11,73	10,73	34	12,93	10,21	12,14
35	9,86	10,49	10,8	35	9,26	12,75	12,12	35	10,25	12,11	12,82
36	11,6	11,51	10,06	36	11,9	11,31	9,8	36	11,98	12,5	12,5
37	9,3	9,71	12,07	37	9,38	9,21	12,91	37	10,31	11,78	9,78
38	10,72	12,9	12,09	38	11,94	10,06	12,71	38	10,15	10,73	12,06
39	9,27	11,93	10,17	39	11,8	9,79	12,58	39	11,21	12,23	10,69
40	11,57	11,4	9,31	40	9,73	9,3	10,62	40	9,88	10,57	9,53
41	11,33	9,31	10,02	41	9,4	12,51	12,58	41	9,57	10,91	12,1
42	9,9	9,73	11,79	42	9,18	12,25	9,31	42	12,89	9,28	13
43	10,32	11,86	9,58	43	12,6	10,53	12,68	43	9,33	11,81	12,71
44	10,28	12,37	11,31	44	10,2	10,63	9,55	44	10,85	10,9	12,22
45	9,17	10,53	10,28	45	11,59	11,91	12,52	45	10,9	9,85	10,88
46	12,85	9,25	12,96	46	12,82	11,75	11,33	46	9,76	9,5	10,31
47	11,39	12,82	12,85	47	11,42	10,85	10,94	47	12,3	9,63	9,4
48	10,75	11,04	11,34	48	10,14	12,77	12,86	48	12,17	10,17	10,71
49	12,22	11,61	12,72	49	11,16	9,78	10,28	49	12,47	9,68	10,3
50	11,55	10,84	9,32	50	10,88	12,63	12,93	50	11,03	11,77	10,21

Fuente: Elaboración propia

Debido a la extensión de la información, sólo se muestran las primeras 50 tomas de tiempo.

Analizando los datos de la Tabla 4, se determinó el promedio de atención para el día de mayor demanda de ingreso al parqueadero, es decir el domingo 19/11/2017 (Ver Tabla 3).

El tiempo promedio de atención del acceso al parqueadero fue de 10,66 segundos. La Atención promedio por hora sería:

$$\frac{1 \text{ hora}}{11,07 \frac{\text{segundos}}{\text{vehículo}}} \frac{3600 \text{ segundos}}{1 \text{ hora}} = 325 \text{ vehículos/hora}$$

Es decir que la tasa media de servicio (μ) es de 325/hora

8.2.1 Análisis Sistema de Colas.

Al igual que para el acceso por la Calle 53, para el análisis del sistema para este acceso se utilizarán las fórmulas del modelo MMK de teorías de colas el cual quiere decir que existen K servidores con llegadas tipo Poisson y tiempos de servicio exponenciales. (Ver sección Marco Teórico).

Tabla 10.

Datos Cra. 50

DATOS		
λ	145	Vehículos/hora
μ	325	Vehículos/hora

Fuente: elaboración propia

- a. Probabilidad de tener cero (0) vehículos en el sistema para K servidores

Este caso es la probabilidad que no haya vehículos en cola ni en los servidores.

Tabla 11.

Resultados $P(0)$ Cra. 50

$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{K-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{K!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^K \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$		
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)
0,0	1,000	
1,0	0,446	55,38%
2,0	0,100	63,52%
3,0	0,015	63,98%
4,0	0,002	64,01%
5,0	0,000	64,01%
6,0	0,000	64,01%

Para este caso el modelo muestra probabilidades más altas que el acceso por la Calle 53; esto debido a que la tasa media de llegadas (λ) es más baja.

Funcionando con dos servidores, la probabilidad de que haya cero (0) vehículos en el sistema es de 63,52%, es decir que el 36,48% de las veces el sistema se encontraría ocupado. Después de tres (3) servidores las probabilidades son muy parecidas, por lo que el punto óptimo sería hasta tres (3) servidores.

b. Tiempo promedio gastado en la cola $E(w)$

El tiempo promedio que el usuario del servicio debe esperar en la cola hasta llegar al punto de atención.

Tabla 12.

Resultados $P(0) / E(w)$ Cra. 50

	$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$		$E(w) = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)! (k\mu - \lambda)^2} P_0$
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)	E(W) (s)
0,0	1,000		
1,0	0,446	55,38%	8,923
2,0	0,100	63,52%	0,580
3,0	0,015	63,98%	0,048
4,0	0,002	64,01%	0,004
5,0	0,000	64,01%	0,000
6,0	0,000	64,01%	0,000

Si este acceso funcionara con un solo servidor, el tiempo promedio de espera en cola sería de casi 9 segundos, en cambio con dos y tres servidores, el tiempo de espera se reduce a menos de un segundo. De cuatro servidores en adelante, el tiempo de espera es inexistente de acuerdo al modelo.

c. Tiempo promedio gastado en el sistema (incluyendo tiempo de cola y servicio) $E(v)$

El tiempo promedio que el usuario del servicio debe esperar tanto en cola como siendo atendido hasta llegar al punto de atención.

Tabla 13.

Resultados $P(0) / E(w) / E(v)$ Cra. 50

	$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$		$E_{(w)} = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{(k-1)! (k\mu - \lambda)^2} P_0$	$E_{(v)} = E_{(w)} + \frac{1}{\mu}$
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)	E(W) (s)	E(v) (s)
0,0	1,000			
1,0	0,446	55,38%	8,923	20,000
2,0	0,100	63,52%	0,580	11,657
3,0	0,015	63,98%	0,048	11,125
4,0	0,002	64,01%	0,004	11,081
5,0	0,000	64,01%	0,000	11,077
6,0	0,000	64,01%	0,000	11,077

Fuente: elaboración propia

Como se visualiza en la tabla, definitivamente el sistema no puede operar con un (1) solo servidor ya que se formarían largas colas en las horas de mayor demanda. También se puede observar que entre tres y cuatro servidores los resultados son muy cercanos, por lo que se puede afirmar que con tres servidores el sistema funcionaría en su nivel óptimo, por lo tanto se concluye que el acceso por la Cra. 53 tiene posibilidades de mejora en sus tiempos de atención en horas de mayor demanda al habilitar a tres (3) servidores el acceso a la zona de parqueo.

d. Probabilidad de tener n vehículos en el sistema

Tabla 14.

Resultados P(n) Cra. 50

$P(0) = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \left(\frac{k\mu}{k\mu - \lambda}\right)}$			1	2	3	4	5
K	$\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$	p(0)	p(1)	p(2)	p(3)	p(4)	p(5)
0,0	1,000						
1,0	0,446	55,38%	24,71%	11,02%	4,92%	2,19%	0,98%
2,0	0,100	63,52%	28,34%	6,32%	1,41%	0,31%	0,07%
3,0	0,015	63,98%	28,54%	6,37%	0,95%	0,14%	0,02%
4,0	0,002	64,01%	28,56%	6,37%	0,95%	0,11%	0,01%
5,0	0,000	64,01%	28,56%	6,37%	0,95%	0,11%	0,01%
6,0	0,000	64,01%	28,56%	6,37%	0,95%	0,11%	0,01%

Fuente: elaboración propia

Para P(n) se utilizan las siguientes fórmulas mencionadas en el capítulo Marco Teórico

$$P(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P(0) \quad \text{para } 0 \leq n < k \qquad P(n) = \frac{1}{k!k^{n-k}} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P(0) \quad \text{para } n \geq k$$

El modelo muestra que para el caso de $p(0)$ la probabilidad de que el sistema esté vacío va aumentando en la medida que aumenta K , es decir el número de servidores. Lo mismo sucede para $p(1)$, sin embargo a partir de $p(3)$ en adelante, las probabilidades de que haya 3 o más usuarios en el sistema, van disminuyendo en la medida que aumentan los servidores, mostrando los niveles de servicio en diferentes escenarios.

Probabilidad de ser atendido inmediatamente para $K = 2$

- Que el sistema se encuentre vacío, es decir $p(0)$
- Que haya un vehículo en el sistema, es decir $p(1)$

$$63,52\% + 28,34 = 91,86\%$$

Por lo tanto, la probabilidad de ser atendido inmediatamente es de 91,86% y de tener que esperar en la fila sería de 8,14%.

En un escenario con $K = 2$ servidores, ¿cuál es la probabilidad que el sistema esté en su máxima capacidad si sólo tiene un (1) espacio en el carril de espera?

En este caso debo sumar $p(0) + p(1) + p(2) + p(3) = 99,60\%$

Eso quiere decir que la probabilidad que este sistema colapse es prácticamente inexistente.

Se puede concluir que, aunque ambos accesos al parqueadero del Centro Comercial Portal del Prado no presentan un mal funcionamiento, no están funcionando según los niveles óptimos, ya que el modelo propone cuatro (4) servidores para el acceso por la Calle 53 y tres (3) servidores para el acceso por la Cra. 50.

Por otro lado, y de acuerdo al Decreto 0212 de 2014, el Centro Comercial no cuenta con calzadas alternas las cuales garantizan que en los momentos de mayor demanda, las líneas de espera a los parqueaderos no se desborden hasta las vías públicas.

8.3 Descripción y Análisis de las Operaciones de Cargue y Descargue de Mercancías

El acceso a la zona de cargue y descargue del centro comercial Portal del Prado se encuentra ubicado sobre la carrera 50. Estas labores inician diariamente a las 6:00 am, hora en que se habilita el acceso a los vehículos para realizar estas operaciones y finalizan a las 8:00 pm, horario después del cual no ingresan vehículos a no ser previa autorización del jefe de seguridad. El lugar se mantiene abierto hasta que finaliza la jornada con personal de vigilancia permanente.

Esta zona tiene una capacidad para albergar hasta seis furgones de seis (6) metros de largo por dos (2) metros de ancho y tiene dos plataformas habilitadas para el cargue y descargue de mercancías u otros. Está permitido el ingreso de todo tipo de vehículos que no superen los tres metros de altura debido a que es una zona cubierta.

La autorización de ingreso de los vehículos se obtiene previa solicitud realizada por algún local o almacén del centro comercial vía correo electrónico a la administración, aportando la información del transporte y tipo de operación a realizar. Esta información es comunicada al área de seguridad de la zona de cargue y descargue, quienes corroboran que el vehículo coincida con las descripciones aportadas por la administración. Los vehículos pueden ingresar en cualquier horario, no se aportan citas para su ingreso.

De acuerdo a la información aportada por el personal del centro comercial como la observación realizada, no se forman colas en el acceso a esta zona debido a que las puertas permanecen abiertas durante toda la jornada de trabajo y la verificación de los vehículos se realiza rápidamente, sin embargo aseguran que si se forman colas entre las 5:30 am y 6:00 am, horario en el que el flujo vehicular es bastante bajo en la zona, por tanto no se presentan incidentes.



Figura 9. Acceso a la Zona de Descargue de Mercancías Cra. 50. Recuperado de Google Maps

8.4 Descripción y Análisis del Manejo Interno del Servicio de Taxis

El centro comercial cuenta con dos bahías habilitadas para el embarque y desembarque de usuarios del servicio de transporte y están ubicados en las dos entradas, la entrada ubicada sobre la Calle 53, la cual es una rampa y la entrada ubicada en la esquina entre la Calle 53 y la Cra. 50, ésta bahía bordea la esquina y va hacia la Cra. 50. La longitud total de esta zona es de alrededor de 300 metros los cuales pueden albergar alrededor de 50 taxis.

Para la prestación de este servicio el centro comercial tiene contratos con dos empresas, Estación Taxi Portal, cuyo contrato está relacionado directamente con el centro comercial y Asociación de Conductores de la Estación de Taxis SAO 53, contrato relacionado con el Almacén SAO. Ambas empresas cuentan con coordinadores quienes se encargan de ofrecer el servicio e informar la tarifa a los clientes de acuerdo al recorrido, y un supervisor, empleado del centro comercial, se encarga de vigilar y controlar que estas empresas presten el servicio de acuerdo a los lineamientos establecidos.

La disciplina que los taxistas siguen para la prestación del servicio es “primero en turno, primero que sale” y dicha disciplina es controlada por los coordinadores.

Está prohibido que taxis de otras empresas o independientes se estacionen en las bahías a la espera de clientes, y en caso que un taxi de una empresa no autorizada esté desembarcando personal y un cliente del centro comercial quiera acceder a su servicio, los coordinadores de las empresas autorizadas tienen la responsabilidad de advertirle que el servicio lo toma bajo su propia responsabilidad, por tanto no podrán aceptar reclamos ante cualquier suceso que atente contra su seguridad o sus bienes.

De acuerdo al flujo de taxis se pudo observar que los tamaños de las bahías del centro comercial son apropiadas para la prestación de este servicio, en ningún momento se evidenció que los taxis de las estaciones autorizadas utilizaran las vías públicas como zonas de parqueo; sin embargo, este problema si se está presentando con los llamados “taxis piratas” los cuales se estacionan en las orillas de la vía pública, situación que ya ha sido denunciada por el centro comercial ante las autoridades competentes.

Las fotos a continuación muestran las bahías descritas anteriormente.



Figura 10. Vista Aérea Bahía o Rampa para Taxis Calle 53. Recuperado de Google Maps



Figura 11. Bahía de Taxis Esquina Cra. 50 – Cl 53. Recuperado de Google Maps

9. Conclusión

Este trabajo de investigación inició con la pregunta problema ¿Cómo se puede mejorar el desempeño de las líneas de espera en los accesos a la zona de parqueo de los centros comerciales? Después de realizar las investigaciones pertinentes, revisar los aportes teóricos y matemáticos ingenieriles, investigar en la normatividad vigente aplicable al objeto de estudio y aplicar estos conocimientos en un caso real se pudo determinar la metodología de modelación adecuada para dar solución a la pregunta anteriormente expuesta y llegar a las siguientes conclusiones:

El modelo matemático de teoría de colas MMK es una herramienta clave y pertinente para el diseño, configuración y optimización de las líneas de espera en los parqueaderos de centros comerciales y en general de cualquier Polo Generador de Viaje, ya que describe el comportamiento de este tipo de sistemas, permitiendo modelar y visualizar diferentes escenarios, así obtener conclusiones objetivas y sustentables como se puede ver en el caso aplicado en el centro comercial Portal del Prado. En este caso, se pudo analizar el desempeño actual del sistema en contraste con escenarios de menor y mayor número de estaciones de servicio, permitiendo concluir que el sistema tiene un funcionamiento adecuado con posibilidades de mejora al incrementar en un servidor para el acceso por la Cra. 50 y hasta dos servidores más para el acceso por la Calle 53. Aplicar esta mejora tendría un impacto sobre la experiencia de los usuarios con respecto al servicio.

Otro aspecto que se pudo concluir con esta investigación es que el Centro Comercial Portal del Prado no cuenta con las calzadas de servicio reglamentadas por el Decreto 0212 de 2014 y que son necesarias para mitigar el impacto del centro comercial sobre las vías públicas. Si bien el

modelo muestra que el centro comercial Portal del Prado tiene un buen funcionamiento de sus líneas de espera, no por ello puede sostener que no requiere de estas calzadas, pues es una exigencia normativa y son las que garantizan que en los sucesos de mayor demanda, las líneas de espera no llegaran hasta la vía pública.

Por último, esta experiencia es pertinente para el desarrollo y aplicación de los conocimientos adquiridos en el aula clase y entender cómo con estos conocimientos se pueden generar aportes de servicio para el mejoramiento y avance de la sociedad.

Referencias

- Abad, R. C. (2002). *Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas*. Coruña: Netbiblo S.L.
- Abril, L. R. (2001). *Investigación de Operaciones para Ingenierías y Administración de Empresas*. Palmira.
- Ayala, M. R. (año 2018). Monitoreo a bajo costo del rendimiento de la construcción mediante la herramienta Time-Lapse: Caso de estudio en Barranquilla. *Revista Daena: International Journal of Good Conscience*, p 43.
- Barranquilla, A. d. (2008). Decreto No. 0519. p. 3, 4. Barranquilla, Atlántico.
- Barranquilla, A. d. (2014). Decreto 0212. p. 310. Barranquilla, Atlántico.
- Committee, T. R. (2000). Obtenido de https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf
- David de la Fuente, R. P. (2001). *Teoría de Líneas de Espera Modelos de Cola*. Gijón: Servicio de Publicaciones Universidad de Oviedo.
- Duque, L. M. (2011). *invoperacioneslu*. Obtenido de <http://invoperacioneslu.blogspot.com/p/teoria-de-colas-o-linea-de-espera.html>
- Figuera, D. S. (2002). *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones*. Barcelona.
- Francisco Miranda, S. R. (2005). *Manual de Dirección de Operaciones*. España: International Thomson Editores Spain.
- Globedia. *El diario colaborativo*. (Abril de 2013). Obtenido de <http://co.globedia.com/ingenieria-teoria-colas>
- Hillier, S. y. (2010). *Teoría de Colas en Introducción a la Investigación de Operaciones*. Mexico: McGraw-Hill / Inter Americana Editores.
- Lipcia Munguía, M. P. (2005). *Investigación de Operaciones*. San José: Euned.
- Lorely Ordoñez, J. J. (2012). *Teoría de colas*. Obtenido de <http://teoria-de-colas.blogspot.com/2012/01/historia-de-la-teoria-de-colas.html>
- Lozano, G. J. (2002). *Investigación Operativa II*. Manizales.
- Marín, A. (Septiembre de 2001). *Ampliación de Modelos de Investigación Operativa Licenciatura de Matemáticas Universidad de Murcia*. Obtenido de <https://www.um.es/or/ampliacion/node5.html>
- Martínez, H. S. (Diciembre de 2017). *Emprendices*. Obtenido de <https://www.emprendices.co/teoria-colas-lineas-espera/>

Naim Caba, O. C. (2011). *Toma de Decisiones a Través de la Investigación de Operaciones*.

Olivares, A. (Junio de 2014). *iocontadoresuaeh*. Obtenido de <http://iocontadoresuaeh.blogspot.com/2014/06/estructura-de-la-teoria-de-colas-o.html>

Pablo Serrano, J. H. (2017). *Introducción Amable a la Teoría de Colas*. Madrid.

Parra, N. (2011). Obtenido de <http://investigaciondeoperacionesnaty7.blogspot.com/p/teoria-de-colas.html>

Perez, J. I. (Octubre de 2017). *Comunycarse*. Obtenido de <https://www.comunycarse.com/es/teoria-colas-los-modelos-formulas-problemas-resueltos/>

PORTILLA, L. M., ARIAS MONTOYA, L., & FERNÁNDEZ HENAO, S. A. (2010). ANÁLISIS DE LÍNEAS DE ESPERA A TRAVÉS DE TEORÍA DE COLAS Y SIMULACIÓN. *Revista Scientia Et Technica*.

Richard, V. (1988). *Introducción a la Ingeniería Industrial*. Iowa: Reverté S.A.

Roberto Carro, D. G. (s.f.). Obtenido de http://nulan.mdp.edu.ar/1622/1/17_modelos_lineas_espera.pdf

Sarabia, A. (1996). *La investigación operativa: una herramienta para la adopción de decisiones*. Madrid: Ed. Gráf. Ortega.

Serna, C. (Abril de 2011). *inoperaciones7*. Obtenido de <http://inoperaciones7.blogspot.com/2011/04/notacion-de-kendall-lee-para-los.html>

Sixto Rios, A. M. (2004). *Investigación Operativa Modelos Determinísticos y Estocásticos*. Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, S.A.

Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones*. Mexico: Pearson.

Telecomunicaciones, Foro Histórico de las. (2018). Obtenido de <http://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/erlang-agner-krarup#>

Viejo, A. S. (1996). *La investigación operativa: una herramienta para la adopción de decisiones*. Madrid: Ed. Gráf. Ortega.

Anexos

Anexo A. Cuestionario de Preguntas. Operación de Cargue y Descargue Centro Comercial

Portal del Prado

1. ¿Cuál es el proceso para que una tienda del centro comercial pueda recibir mercancía para su abastecimiento?
2. ¿Cuáles son los horarios de servicio?
3. ¿Se han presentado incidentes o congestiones en la vía por ser ésta una zona de descargue del C.C.? Explique
4. ¿Tienen restricciones de peso y de vehículos de carga?
5. ¿Tienen restricciones por parte de las autoridades en cuanto a días y horas para realizar sus procesos de cargue y descargue?
6. ¿Cuántos vehículos puede albergar esta zona?
7. ¿Con cuántas plataformas cuenta esta zona para realizar las actividades de cargue y descargue?

Anexo B. Cuestionario de Preguntas. Servicio de Taxis en Centros Comerciales

1. El centro comercial tiene exclusividad con alguna empresa de servicio de taxis? Cual?
2. El C.C. tiene habilitadas zonas especiales y adecuadas para el embarque, desembarque y parqueo de taxis? Descríbalas
3. Considera que el espacio dispuesto por C.C. para los taxis es suficiente? Porque?
4. Existe una disciplina en el orden de los taxis para la prestación del servicio en todas las zonas?
5. ¿Qué capacidad tiene la zona de taxis? (cuantos taxis caben en la zona de parqueo?)
6. Describa como opera este servicio en el centro comercial