



APLICACIÓN DE UN MODELO QUE PERMITA ESTIMAR LA CAPACIDAD OPERATIVA EN GESTIÓN
DE PASAJEROS EN LOS PUNTOS DE VERIFICACIÓN DE DOCUMENTOS Y FILTROS DE SEGURIDAD
DEL AEROPUERTO JOSÉ MARIA CÓRDOVA.

CRISTIAN CAMILO MONSALVE DUQUE

Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de magister en ingeniería

Asesor

Sergio Ramirez Echeverri

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA

MEDELLIN

2025

Agradecimiento

Quiero agradecer a la Universidad Eafit por abrirme las puertas de sus aulas y guiarme en una educación integral, siempre tendré en mis bases una educación de calidad que me fue transmitida con mucho profesionalismo.

A todos los docentes con los que compartí intensas horas de estudio, al profesor Sergio Ramirez que desde un inicio me brindo su ayuda y sus conocimientos al enfocar la problemática de esta investigación.

A la empresa Airplan que me permitió indagar sus procesos, evaluarlos y contemplar mejoras en ellos, no me queda duda que son de los mejores en la labor que desempeñan.

CONTENIDO

pág.

0. INTRODUCCIÓN	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	16
3.1. GENERAL	16
3.2. ESPECÍFICOS	16
4. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL	17
5. DISEÑO METODOLÓGICO O METODOLOGÍA	21
5.1. FASE 1: ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO Y FLUJO DE PASAJEROS	22
5.2. FASE 2: RECOLECCIÓN DE DATOS	22
5.3. FASE 3: ELABORACIÓN DEL MODELO	22
5.4. FASE 4: VALIDACIÓN Y AJUSTES	22
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
6.1. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO Y FLUJO DE PASAJEROS	23
6.2. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	23
6.2.1. Medición de tiempos de proceso en verificación de pases de abordar	26
6.2.2. Medición de tiempos del proceso en inspección con rayos x	28
6.3. ELABORACIÓN DEL MODELO.....	30
6.3.1. Identificar la hora pico en operaciones del aeropuerto	30
6.3.2. Definir la distribución de llegada de pasajeros	31
6.3.3. Asignar distribución de los pasajeros a los vuelos en hora pico con un LF 95%	31
6.3.4. Implementación de parámetros en el método en teoría de colas M/M/s.....	32
6.3.5. Simulación de eventos discretos en la llegada de los pasajeros al verificador de documentos e inspección por rayos X.	34
7. RESULTADOS	36
8. CONCLUSIONES	43
REFERENCIAS.....	47
ANEXOS	50

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Determinación del tamaño total de la muestra en verificadores de documentos	27
Tabla 2. Determinación del tamaño total de la muestra en inspección por rayos X	28
Tabla 3. Hora pico de operaciones y pasajeros saliendo con destinos nacionales	30
Tabla 4. Distribución estimada en llegada de pasajeros al aeropuerto José Maria Córdova	31
Tabla 5. Estabilidad sistema de rayos x	44

LISTA DE FIGURAS

pág.

Fig 1. Procesos en atención de pasajeros según sus requerimientos	11
Fig 2. Conceptos para establecer niveles de servicio (LoS)	18
Fig 3. Distribución de operaciones (dom/inter)	24
Fig 4. Participación de aerolíneas en las operaciones	24
Fig 5. Curva de llegada de pasajeros domestico vs internacional	25
Fig 6. Tiempos de verificación en 197 muestras	27
Fig 7. Tiempos de inspección ciclo total con rayos X en 179 muestras	28
Fig 8. Rendimiento del proceso de inspección de pasajeros con rayos x en franjas de 5 minutos	29
Fig 9. Operaciones combinadas viernes 23 mayo del 2025	30
Fig 10. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	36
Fig 11. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	36
Fig 12. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	37
Fig 13. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	37
Fig 14. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	38
Fig 15. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	38
Fig 16. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	39
Fig 17. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	39
Fig 18. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	40
Fig 19. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	40
Fig 20. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	41
Fig 21. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	41
Fig 22. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X	42
Fig 23. Resultados tiempos de espera de los pasajeros	42
Fig 24. Distribución de llegada de pasajeros al aeropuerto José Maria Córdova	43

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1 Determinación del tamaño de la muestra	26
Ecuación 2 Tasa de servicio (μ) de verificadores	32
Ecuación 3 Tasa de servicio (μ) de maquina rayos X	33
Ecuación 4 Estabilidad del sistema por subsistema (verificadores/rayos x)	33
Ecuación 5 Longitud de las líneas de espera	35

LISTA DE SÍMBOLOS O VARIABLES

λ Tasa de llegada de pasajeros (pasajeros/minuto).

μ Tasa de servicio del servidor (pasajeros/minuto).

c Número de servidores (verificadores o máquinas de rayos X).

ρ Utilización del sistema $\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$.

S Tiempo promedio de servicio (minutos o segundos).

A Tiempo promedio entre llegadas (minutos o segundos).

LoS Nivel de servicio

Resumen

La limitación de espacios y la creciente demanda de pasajeros en el aeropuerto José María Córdova ha generado la necesidad de innovar en diferentes formas y metodologías las cuales puedan ayudar a optimizar los diferentes recursos en gestión de los pasajeros, entre ellos se tienen los equipos tecnológicos, infraestructura y procedimientos. Mediante herramientas de simulación y análisis de datos, se obtendrá la capacidad efectiva de todo el procedimiento en inspección de pasajeros a las salas de abordaje. Se ha determinado que todo pasajero al contratar un vuelo con alguna aerolínea que presta el servicio en el terminal debe como primera medida para ingresar a salas de espera, permitir la verificación de su documento de identidad y pase de abordar por un agente de seguridad, luego que se valide la documentación, se deberá dirigir a la zona asignada para la inspección de equipajes de cabina por el lector de rayos X y el escaneo corporal, esto con el fin de detectar elementos prohibidos por la autoridad, los cuales se consideran un riesgo para la seguridad de la aviación civil. Actualmente en las horas pico de operaciones, se presentan grandes cantidades de pasajeros realizando fila para iniciar su ingreso a salas de abordaje. Dada esta situación, se busca determinar la capacidad actual en atención de los agentes verificadores de documentos y las máquinas de rayos X, mediante herramientas matemáticas y simulación estadística para la evaluación del comportamiento de los pasajeros en diferentes escenarios que puedan demostrar similitud con la dinámica actual y la creciente de la demanda. Luego de determinar la capacidad instalada, se dejará esta información como insumo para toma de decisiones por la empresa en la posible implantación de verificadores automáticos, redistribución de los servidores o la modernización de equipos, etc. Los cuales determinaran un impacto en la operación y en sus niveles de servicio.

Palabras clave: Capacidad aeroportuaria, Puntos de verificación, Filtro de seguridad, Nivel de servicio (LoS), Teoría de colas, Modelo matemático, ADRM, Capacidad operativa, Rendimiento del sistema, Análisis de desempeño, Flujo de pasajeros.

0. INTRODUCCIÓN

Al pasar de los años, el transporte de personas y carga ha sido un recurso más que necesario para el desarrollo y la evolución de los humanos en sus entornos. Entre todos los medios de transporte, el aéreo ha generado una gran atracción en todo el mundo por su rapidez, seguridad y confiabilidad. Las operaciones aeroportuarias cada día requieren procesos más eficientes, seguros y normativos, los cuales hacen que las terminales optimicen cada espacio que tengan disponible para hacer frente al constante crecimiento de pasajeros que se da día a día y se garantice servicios con buenos niveles de atención.

El aeropuerto internacional José María Córdova que presta el servicio a la ciudad de Medellín, se ubica en el territorio colombiano como el segundo terminal aéreo en magnitud de pasajeros atendidos y operaciones realizadas. Este crecimiento positivo que se está dando plantea grandes retos en las operaciones, ya que, al ser una puerta de conexión a todo el mundo, se exige de tal forma que los procesos cumplan con rigurosidad altos niveles de seguridad para la aviación civil y un cumplimiento exhaustivo en los tiempos operacionales en itinerarios coordinados por las aerolíneas.

Al exponer esta necesidad, se realizará una investigación que propone la elaboración de un modelo matemático que pretende estimar la capacidad operativa en los procedimientos de verificación de documentos y la inspección de pasajeros en rayos-x. Este modelo será de ayuda para determinar el rendimiento del sistema en flujo de pasajeros y estimar las consecuencias económicas, funcionales y perspectiva del servicio en operaciones híbridas o automatizadas en un futuro.

La investigación pretende apoyarse en teorías ya establecidas en diferentes entornos industriales y logísticos como teoría de colas, eventos discretos y criterios normativos en nivel de servicio por organismos internacionales como la OACI. Orientada en estos principios, se evaluarán los resultados para determinar una implementación que brinde mejoras operacionales, eficiencia en la infraestructura y niveles de servicio que brinden al pasajero satisfacción, comodidad y seguridad en sus viajes.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El modelo operativo de los aeropuertos, tanto nacionales como internacionales están estructurados en direccionar la llegada de pasajeros y sus acompañantes a un área pública, aquí algunos requieren un servicio de entrega de maletas y realizar check-in de vuelo. Posteriormente, el 100% de los pasajeros deben pasar por la verificación de sus pases de abordar, la inspección de seguridad y luego ingresar al avión por la puerta (gate) asignado. Esto ha generado que se empleen diferentes metodologías de análisis y propuestas de mejora que impactan el servicio y la eficiencia operativa, entre ellas está el modelo SBC (Stationary Backlog Carryover) que brinda una herramienta para analizar líneas de espera de pasajeros en entornos no estacionarios. Este permite evaluar los niveles de servicio (Los) de cada subsistema y compensar costos operativos con la satisfacción del pasajero, determinado una asignación de recursos aeroportuarios en función de la variabilidad de la demanda [1].

Con el objetivo de reducir la incertidumbre en la demanda de pasajeros en el transporte aéreo y ganar nivel de la eficiencia operativa, en el aeropuerto de Pula (Croacia) implementaron un enfoque metodológico en asignación de los recursos aeroportuarios. Este enfoque combina pronóstico cuantitativos de demanda de pasajeros con la estructura necesaria para su atención y un modelo multicriterio de niveles de servicio (Los) enfocado en la operación creciente de aerolíneas de bajo costo, las cuales priorizan funcionalidad y rapidez de los procesos por encima de los lujos o confort, brindando una herramienta eficaz para la asignación flexible de recursos y adaptable ante la variabilidad de la demanda [2].

El proceso de atención de pasajeros en los aeropuertos se clasifica en una o dos etapas (One Stop y Two Stop) [3], el siguiente diagrama, demuestra las rutas que sigue un pasajero al iniciar con la comprar su ticket de vuelo y terminar en la puerta de embarque de este.

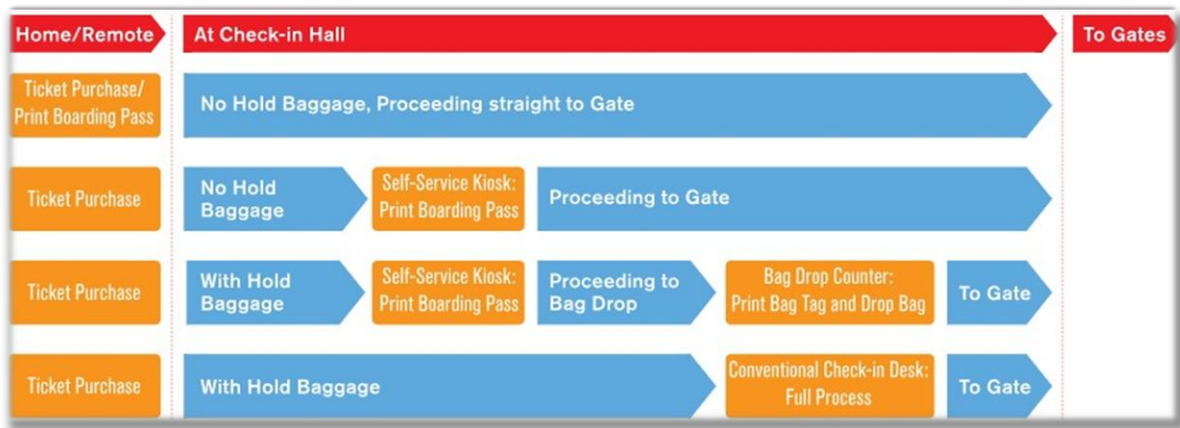


Fig 1. Procesos en atención de pasajeros según sus requerimientos

Fuente: ADRM [3]

Aquí se expone claramente el uso de recursos y áreas para realizar check-in, estos dependiendo del tipo de pasajero y equipaje seleccionado. Con la automatización y la clasificación de flujos se ha logrado mejoras en los niveles de servicio y eficiencia en la atención de pasajeros, generando un alto flujo y saturación de los servidores que verifican los pases de abordar y las máquinas de inspección con rayos x en las horas pico del aeropuerto José Maria Córdova.

El flujo de pasajeros en los terminales de transporte es evaluado, [4] mediante un modelo matemático para calcular la distribución en tiempo real de los flujos de pasajeros en diferentes tasas de entradas. Este flujo por el terminal hacia las salas de abordaje dependerá a la cantidad de tiempo que disponga antes de la partida del vuelo. El uso de sistemas de espera o teoría de colas tiene gran impacto en varios campos logísticos. En este caso siendo de gran ayuda al implementarse en el control de acceso a sistemas de atención, determinando la efectividad de servidores con la tasa de llegada de solicitudes, dado esto se logran mejoras en tiempo de resolución de accesos y verificación de periodos en inactividad[5].

Brun, Feron, Alam y Dalehaye [6] concluyen mediante un estudio que una programación eficaz del personal de seguridad pudo aliviar la congestión de pasajeros en el aeropuerto Charles de Gaulle. Un proceso que da predicciones de flujo por una red neuronal y genera unos posibles horarios para programar el personal de seguridad. En este mismo aeropuerto algunos autores [7] realizaron un caso de estudio que gestiona la capacidad en tierra debido a la incertidumbre, donde se gestiona la operación lado aire y mitiga conflictos de recursos en los servicios ofrecidos a pasajeros. Así como en el aeropuerto Charles de Gaulle se presentan restricciones en capacidad para atender la demanda de pasajeros y se explora

soluciones mediante herramientas de optimización, así también se da el comportamiento de pasajeros en los aeropuertos latinoamericanos, los cuales cuentan con la particularidad de tener una alta limitación en presupuestos que restringen la efectividad de las operaciones.

Tanto en los sistemas de producción y de servicios, se ha implementado en gran medida la simulación estadística complementada con dinámica de sistemas y variables discretas, el gran enfoque de estas herramientas es predecir los posibles acontecimientos que se dan en las situaciones reales mediante distribución de probabilidades en las variables que se identifiquen en la caracterización del proceso. Los casos de estudio realizados en simulación tienen la gran ventaja de no improvisar con propuestas en el proceso durante su actividad real, por el contrario, si se tiene una buena estructuración y análisis del comportamiento se puede adaptar lo más cercano posible a la realidad[8].

Determinando que todos los recursos asignados a la logística en prestación de servicios a los pasajeros, aerolíneas y todo el personal aeroportuario, Ludovica y Marta [9] realizaron una investigación en el aeropuerto internacional de Nápoles, definiendo un algoritmo eficiente, basado en una simulación de eventos discretos, la cual minimiza la función de costos operativos e impactando de forma positiva la satisfacción de los pasajeros en el terminal. Esta investigación propuso optimizar los espacios y ubicaciones de los recursos que se emplean en el terminal en función de las salidas de pasajeros. Este enfoque integrado podría ser útil para diseñar el tamaño y distribución de áreas en un nuevo aeropuerto. Por otro lado, con un poco más de ambición, en el aeropuerto internacional de Copenhague Dinamarca [10], se implementó un sistema inteligente que gestiona todos los recursos, con ayuda de datos compartidos de todos los implicados del aeropuerto mediante inteligencia artificial. Esta podría ser una opción muy estratégica ya que cada instante se optimizaría más los recursos del terminal para la prestación del servicio de cada operador que hace uso de estos. De esta forma Liu [11] empleo un sistema de simulación multi agente que representa la incertidumbre de las operaciones en tierra, determinando las iteraciones de varios agentes en un sistema complejo.

En el análisis a diferentes entornos del transporte, se destaca un estudio de capacidad el cual puede ser replicado en terminales o puertos, basado en un modelo de programación lineal entera mixta, este equilibra eficiencia operativa y equidad en el uso de recursos, permitiendo maximizar la utilización de las instalaciones y minimizar las desviaciones respecto a horarios llamativos por intereses comerciales de los operadores [12].

En este contexto surge la necesidad de realizar un análisis detallado del aeropuerto José María Córdova que considere la alta demanda en pasajeros que se ha dado en los últimos años, evaluando las capacidades

de los servidores en verificación de documentos, máquinas de escaneo con rayos X y el nivel de servicio que se presta en estos procedimientos. Mediante este análisis se pretende dar un diagnóstico e identificar variables que sean perceptibles a cambios los cuales reflejen posibles propuestas de desempeño del modelo. Por lo relacionado anteriormente, surge la siguiente interrogante.

¿Se podrá estimar la capacidad operativa en la gestión del uso de verificadores y filtros de seguridad del aeropuerto José María Córdova mediante un modelo matemático?

2. JUSTIFICACIÓN

La globalización y la constante evolución del ser humano por descubrir nuevas oportunidades que beneficien su calidad de vida ha planteado nuevos retos que abordan innovación en logísticas que permitan satisfacer la demanda de movilidad desde un punto de origen a un punto de destino. Un aeropuerto es considerado un sistema operativo con instalaciones y personas que brindan un servicio a clientes. Determinando una logística que permita el intercambio de modalidades de transporte y un punto eficiente de conexión entre pasajeros y los vuelos programados allí[8]. El transporte aéreo al ser uno de los medios de transporte más seguros y rápidos, obliga a que los procesos de atención de pasajeros en los aeropuertos requieran una sincronización al detalle para garantizar estándares normativos de seguridad y agilidad con altos niveles de servicio. Ante este aumento de lineamientos, se ha denotado que los sistemas en terminales de pasajeros suelen ser resilientes ante el desborde de demanda, retrasos de las aerolíneas, avería en infraestructura, entre otros [13].

En los últimos años el sector turístico en el país ha avanzado de manera significativa gracias al trabajo entre líderes de ciudades y gremios comerciales, lo que ha permitido garantizar inversiones, impulsar el crecimiento y atraer un mayor número de visitantes. Este incremento en el flujo de turistas ha generado importantes beneficios económicos para diferentes sectores, generando este crecimiento un desafío para el aeropuerto José María Córdova, ya que el transporte aéreo se ha consolidado como una opción atractiva debido a su seguridad, tiempos de viaje reducidos y tarifas accesibles, lo que motiva su creciente utilización. Este cambio en los hábitos de los pasajeros ha dado lugar a un aumento en la frecuencia de visitantes, un mayor uso de herramientas tecnológicas y la búsqueda de una experiencia de viaje más eficiente, en la que se busca minimizar los tiempos empleados en desplazamientos dentro de los aeropuertos.

La empresa Airplan basa su modelo de negocio en la gestión integral de aeropuertos bajo la modalidad de concesión [14]. Se ha identificado que tanto las instalaciones como los recursos aeroportuarios han llegado a un punto máximo en su evolución. Entre los años 2012 al 2017, se estimó una eficiencia del aeropuerto José María Córdova del 92 % y se estudiaba un alto crecimiento de este según los pronósticos [15]. Los diseños originales y las capacidades proyectadas han alcanzado sus límites y han superado las cifras previstas para las fechas. Según la información del concesionario[16], se concluye que en el año 2024 se rompieron cifras con 13,7 millones de pasajeros movilizados, demostrando según registros históricos un crecimiento de pasajeros anuales del 11%. Mientras tanto los actores del sector turístico

continúan en expansión y proyectando la ciudad al mundo entero como destino turístico y aliado estratégico para la economía del país, pero la infraestructura disponible evidencia restricciones a la capacidad necesaria para absorber la demanda futura.

3. OBJETIVOS

3.1.GENERAL

Implementar un modelo que permita estimar la capacidad operativa en la gestión de pasajeros en los puntos de verificación de documentos y filtros de seguridad del aeropuerto José María Córdova.

3.2.ESPECÍFICOS

Analizar el comportamiento y flujo de los pasajeros, determinando la capacidad actual de procesamiento en los puntos de verificación y filtros de seguridad

Diseñar un modelo que integre técnicas de optimización y simulación para determinar la capacidad óptima de los puntos de verificación y filtros de seguridad, buscando maximizar la eficiencia sin comprometer la seguridad.

Implementar el modelo con simulaciones que permitan comparar la capacidad operativa actual con la capacidad mejorada bajo diferentes escenarios de flujo de pasajeros y tiempos de espera.

4. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL

El crecimiento en la demanda del transporte aéreo está requiriendo cada vez mayor número de servicios aeroportuarios, obligando a mejorar la eficiencia operativa de los diferentes aeropuertos del mundo. Un estudio basado en el análisis en pruebas de causalidad de Granger, han demostrado que el crecimiento económico, la inflación, los precios del petróleo y las tasas de interés están como predictores efectivos de la demanda de pasajeros, influyendo en la capacidad y planes de expansión de los aeropuertos [17]. En Kuwait (país árabe del Golfo Pérsico), se realizó un análisis de afectación en la capacidad del terminal internacional, lo que produjo un rediseño de las rutas de flujo a los servicios, permitiendo una optimización de recursos y mejorando tiempos de servicio mediante estrategias de funcionamiento para incrementar la capacidad instalada del lugar[18].

De igual manera, el aeropuerto internacional de Atenas desarrolló un modelo que analiza el rendimiento global del terminal, buscando equilibrio entre flexibilidad y propuestas viables operativas con los recursos instalados, utilizando un enfoque dinámico de sistemas. Planificar, diseñar y gestionar las operaciones en los aeropuertos constituye actividades complejas, ya que a este lo conforma un grupo determinado de sistemas dinámicos interrelacionados, marcando un alto nivel de sensibilidad a cualquier cambio por políticas operativas o conceptos de distribución física[19].

La alta afluencia de pasajeros en las terminales puede ocasionar que estos adopten comportamientos imprevistos que afectan la planeación logística y eficiencia de las operaciones. Las percepciones que tienen los pasajeros en la eficiencia de los servidores y las longitudes de fila influyen en la carga de trabajo del personal, provocando que en ciertos momentos del día la capacidad operativa del aeropuerto se vea excedida. Esto se ha analizado mediante un modelo de elección discreta tipo Mixed Logit, el cual permite anticipar la formación de cuellos de botella y evaluar diferentes configuraciones operativas del terminal [20]. En el aeropuerto internacional de Brisbane se realizó un modelo para proporcionar información del impacto de variabilidad en las llegadas de pasajeros a los puntos de procesamiento, en este caso de estudio se analizaron varias horas de llegadas antes del vuelo y sus afectaciones en el proceso de abordaje. El tiempo promedio estimado que ayuda a nivelar la capacidad de servicio y controlar los cuellos de botella se da en 120 minutos antes del vuelo [21]. En esta línea, los estudios de simulación pueden ser una gran herramienta para determinar cambios e implementar mejoras en los procesos de los aeropuertos. Si los pasajeros se encuentran satisfechos con un buen nivel de servicio reflejado en tiempos

de espera reducidos y los itinerarios se cumplen, se logra un terminal atractivo para más aerolíneas y ser mucho más rentables[22].

Como proveedores de servicios, los aeropuertos suelen ser auditados bajo estándares de calidad y seguridad civil. Junseok Park e Ilkeyeong Moon [23] estudiaron estrategias para optimizar precios en los servicios al cliente sin priorizar la capacidad de atención. Demostrando que al intentar maximizar los ingresos se puede poner en riesgo la calidad del servicio. La IATA (Asociación Internacional de Transporte Aéreo) estima el termino capacidad a una medida cuantitativa del suministro o prestación del servicio de una instalación de procesamiento para acomodar una demanda sostenida durante un periodo de tiempo determinado en condiciones de servicio específico y define el concepto de nivel de servicio (LoS) para determinar los estándares mínimos de espacios y tiempos de espera que logren satisfacer las necesidades de las terminales, aerolíneas y pasajeros. La metodología clasifica el servicio en 4 categorías: Insuficiente, subóptimo, óptimo y sobredimensionado.

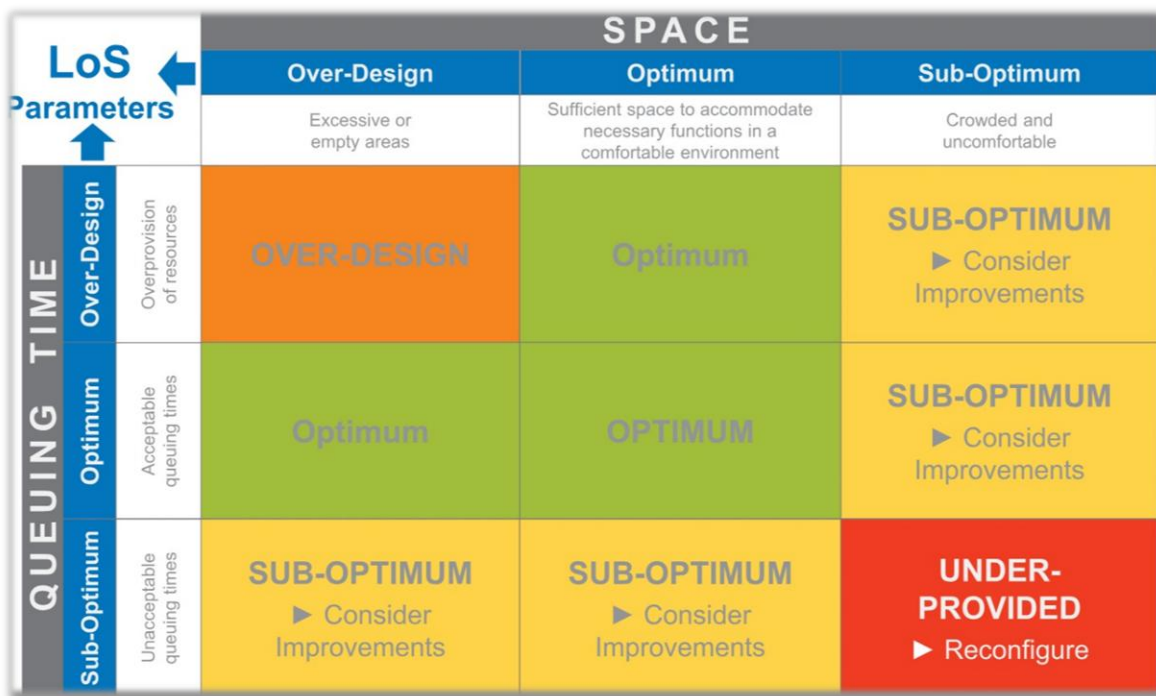


Fig 2. Conceptos para establecer niveles de servicio (LoS)

Fuente: ADRM [3]

Se ha planteado concentrar esfuerzos para lograr un nivel de servicio óptimo en cada subsistema de un aeropuerto, con el objetivo de lograr un nivel óptimo dentro del terminal, logrando un balance entre calidad del servicio y costos operativos[24].

Diversas herramientas son utilizadas para determinar y fortalecer el rendimiento de los recursos aeroportuarios, se tienen modelos basados en dinámica de sistemas, que permiten interactuar con las diferentes configuraciones de terminales, evaluando el impacto de todas las acciones en los subsistemas que conforman el ciclo de servicios[19]. Los flujos de pasajeros en los puntos de control de seguridad en los aeropuertos suelen representar en gran medida un cuello de botella por el elevado estándar de seguridad que se debe garantizar en el sistema aeronáutico. Para abordar esta problemática, se han presentado modelos matemáticos fundamentados en el uso de teoría de colas, aplicando servidores simples y combinados. Esto ha demostrado que la dinámica en llegada de pasajeros a los aeropuertos es compleja y estocástica. Al enfocar el diseño de las líneas de espera, se puede explotar al máximo el uso de los recursos y cubrir los picos de demanda que se presentan y minimizar el riesgo de pérdida de vuelos a los pasajeros[25].

En el aeropuerto regional Ulenurme de Tartu, Stonia, se realizó una modelación matemática para estimar la capacidad del terminal, con herramientas en análisis de probabilidades en los acontecimientos y sus tiempos de procesamiento. Este análisis ayudo a definir espacios y enfocar el nivel de servicio que se prestara a los pasajeros[26]. Este tipo de estudios en las capacidades de aeropuertos toman gran relevancia en el sector debido a que los recursos designados para las operaciones son limitados y los costos de funcionamiento son elevados. Mediante un modelo más de simulación con la ayuda del software Arena, en el aeropuerto internacional Henri Coanda de Bucarest, se buscó optimizar de la mejor manera los recursos, mediante varias combinaciones modulares en asignación de mostradores en check-in y filtros de seguridad, logrando equilibrio entre los procesos de atención a pasajeros en cada subsistema y controlando posibles cuellos de botella en el procesamiento de abordaje[27].

Otro factor y no menos importante es la dinámica del modelo de aerolíneas clasificadas de bajo costo, este modelo se ha fortalecido en muchos aeropuertos del mundo dado las altas sumas de dinero que requiere la aviación para su logística. La reducción de costos operativos y la decisión de pasajeros que prefieren sacrificar algunas comodidades que caracterizaban el transporte aéreo por un boleto económico, básico y funcional, han motivado a que Jelena Pivac, Igor Štimac, Dajana Bartulović and Andrija Vidović [28] realizaran un análisis a diferentes pasajeros que hacían uso de aerolíneas de bajo costo y el entorno del terminal que hacían uso. Estos expresaron que un buen nivel de servicio lo caracteriza tener bajos

tiempos de procesamiento, poco tiempo en filas y constante flujo circulación por el terminal. Observando y conociendo un poco a profundidad las diferentes dinámicas de operación en los aeropuertos, se puede definir un nivel óptimo de servicios (Los) con principios en la metodología del proceso analítico jerárquico (AHP), la cual brinda líneas de ajustes en dimensiones espaciales a las particularidades operativas y expectativas de los pasajeros de las aerolíneas de bajo costo, con el fin de ganar eficiencia operativa sin sacrificar la percepción de un buen servicio.

En contexto, la prestación de un servicio en el cual la llegada de las personas o agentes no se da de forma determinista, sino que esta se presenta de forma aleatoria en un delta de tiempo determinado, presenta grandes retos en la asignación de los servidores que estarán allí para cubrir estas demandas. Según lo expuesto en[29], herramientas y estrategias como la simulación por eventos discretos permite modelar análisis particulares, con menos restricciones y semejanza a la realidad, permitiendo observar el desempeño de estas herramientas brindando ayuda en diferentes sectores industriales como la manufactura y servicios de salud.

En Medellín Colombia se realizó una investigación con implementación de un modelo multicanal de atención a clientes (pacientes) de un centro de salud, logrando una reducción en los tiempos de espera de un 50% y la disminución de tareas operativas de médicos y enfermeros del lugar[30].

5. DISEÑO METODOLÓGICO O METODOLOGÍA

El diseño metodológico en el trabajo de investigación se enfocará en un modelo numérico con herramientas de variables estocásticas, basado métodos como teoría de colas M/M/c, simulación de eventos discretos y programación lineal. También se utilizará la metodología determinística que sugiere IATA (Asociación Internacional de Transporte Aéreo) para obtener los niveles de servicio deseados en la política de la administración del aeropuerto José María Córdova. Se dará una combinación en estos dos modelos ya que se establecerá una capacidad máxima con picos de demanda reales y una variabilidad en la llegada de pasajeros en diferentes escenarios operativos. Se analiza la tasa media de llegada de pasajeros (λ), que requieren hacer el ingreso a las salas de abordaje nacional e internacional del aeropuerto José María Córdova, la tasa media de servicio (μ) con que se atiende a los pasajeros en los verificadores y rayos X, por último, el número de servidores en el sistema de colas (s). Con este enfoque se pretende diagnosticar la situación real del subsistema de abordaje, identificando características de acontecimientos atípicos en la afluencia de pasajeros que incrementen la probabilidad de recurrencia en el tiempo e impacten en la dinámica del modelo.

El estudio tiene un enfoque cuantitativo, demostrando mediante el modelo matemático, variables del procedimiento que determinan comportamientos en un periodo de tiempo con técnicas estadísticas y simulaciones. El tipo de investigación a realizar es de magnitud aplicada, descriptiva y explicativa, ya que se busca resolver un problema de la situación actual del aeropuerto, también se describe el comportamiento y se explicara posibles situaciones de mejora al subsistema de abordajes.

La técnica e instrumentos en recolección de datos se dará con observación directa, recolectando los tiempos en procesamiento de los pasajeros, cantidad de servidores operativos en horas pico de demandas, la tasa de llegada de agentes al sistema de espera y la cantidad de espacio requerida en estos momentos de alta demanda. En el modelo se determinan las siguientes variantes a estudiar:

Independientes

- Números de pasajeros
- Numero de servidores
- Tiempo en procesamientos
- Comportamiento de las filas

Dependiente

- Procesamiento en unidad de tiempo
- Eficiencia
- Tiempo promedio de espera

5.1. FASE 1: ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO Y FLUJO DE PASAJEROS

Observar las particularidades de los pasajeros en los mostradores check-in y en filtro de seguridad, identificando variables que puedan ser útiles en el modelo futuro y definir herramientas digitales que ayuden a analizar los itinerarios de vuelos con sus pasajeros esperados.

5.2. FASE 2: RECOLECCIÓN DE DATOS

Realizar trabajo de campo con ayuda de practicantes que se encuentran en formación y tomar datos aleatorios de pasajeros que llegan a los mostradores a realizar check-in, verificadores de pase de abordar y filtros de inspección de seguridad.

5.3. FASE 3: ELABORACIÓN DEL MODELO

Ordenar los datos obtenidos en campo, limpiar la información y construir los parámetros que aportaran a la estructura del modelo de acuerdo con las metodologías planteadas.

5.4. FASE 4: VALIDACIÓN Y AJUSTES

Compara los resultados obtenidos con los históricos, hacer pruebas que repliquen la realidad de los subprocesos y ajustar el modelo si este presenta resultados atípicos o inconsistentes a la operación.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO Y FLUJO DE PASAJEROS

Como punto de partida, se realiza diferentes observaciones en la zona pública del aeropuerto en distintos momentos del día y la noche. Este lugar es clave porque allí se da la combinación de pasajeros que pretenden viajar a destinos nacionales e internacionales.

Se evidencia que el aeropuerto presenta un alto flujo de pasajeros con destino nacional en las primeras horas de la mañana y al finalizar el día, mientras que en horas intermedias se da un flujo más controlado y en ocasiones esporádico. En los destinos internacionales, el mayor flujo de pasajeros se presenta en la franja del medio día y al finalizar la tarde. Esta situación se pretende en gran medida por las aerolíneas que programan vuelos que conecten con otros aeropuertos estratégicos, donde llegan más pasajeros que tienen destinos similares, esto con el fin de tener operaciones más eficientes y económicamente convenientes.

En cuanto al uso de los mostradores de check-in, presenta una gran afluencia de pasajeros para los destinos internacionales, ya que las aerolíneas deben verificar documentación requerida por el país de destino y recibir el equipaje que se despacha en bodega. Por el contrario, el uso de los mostradores para destinos nacionales en ocasiones está solos o en poco uso por los pasajeros. Esta situación puede estar asociada al modelo de operación de bajo costo por las aerolíneas como JetSMART y Wingo, que motivan al uso del check-in virtual.

Dadas las observaciones, se estima que no todos los pasajeros que compran una posición de un vuelo con las aerolíneas hacen uso de los mostradores check-in, sin embargo, todos deben pasar obligatoriamente a verificación de su pase de abordar y filtros rayos-x, conforme a la normativa aeroportuaria. Este proceso se estima clave para el flujo de pasajeros y por tal motivo es fundamental evaluar su eficiencia operativa para impactar en los niveles de servicio de los pasajeros.

6.2. RECOLECCIÓN DE DATOS

Luego de conocer de manera general la dinámica del aeropuerto, se procede a realizar un análisis más detallado del comportamiento de los pasajeros. Aquí se valida proporciones de pasajeros con destino nacional e internacional, también cuantos de estos hacen uso de los check-in con respecto a los que llegan directamente al filtro de seguridad y con que anterioridad llegan al aeropuerto para iniciar sus registros.

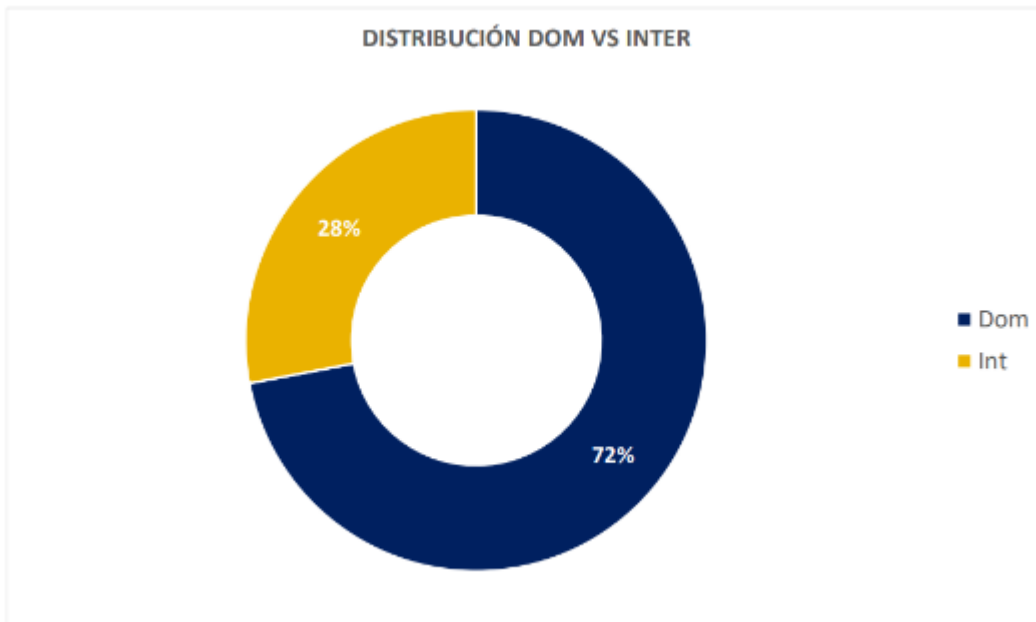


Fig 3. Distribución de operaciones (dom/inter)

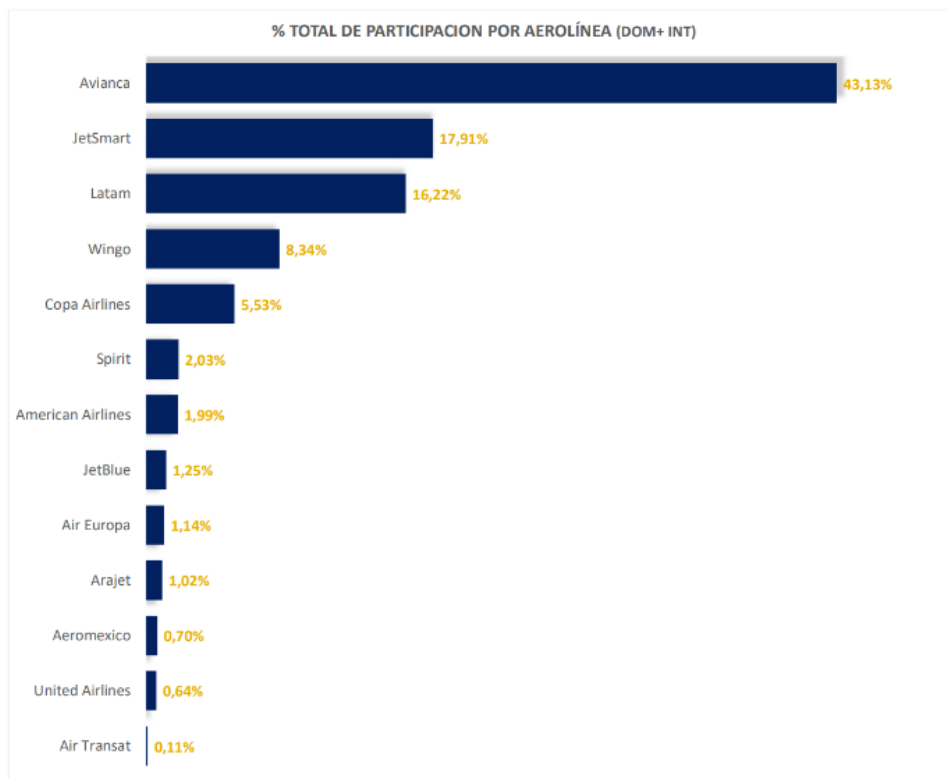


Fig 4. Participación de aerolíneas en las operaciones

Como se aprecia en las ilustraciones anteriores, la mayor parte de operaciones en el aeropuerto son vuelos domésticos, en estas predominan las aerolíneas que operan con un modelo de servicio bajo costo, mostrando una característica particular en los pasajeros y su paso por los mostradores de check-in. Muchos de estos pasajeros con destinos nacionales solo viajan con equipaje de cabina o con poco peso para no entrar en sobre costos en sus tiquetes. Esta dinámica agiliza el paso de los pasajeros por el terminal y la disminución en la demanda de mostradores por las aerolíneas, generando una concentración directa en los filtros de seguridad del aeropuerto.

Para demostrar los perfiles de los pasajeros que llegan a los aeropuertos, IATA [3] indica en la siguiente gráfica, que las llegadas para vuelos domésticos se hacen en un intervalo más corto de tiempo, concentrando la mayoría de estos entre 60 y 90 minutos antes del vuelo y los pasajeros con vuelos internacionales hacen su llegada particularmente alrededor de 120 y 180 minutos antes del vuelo.

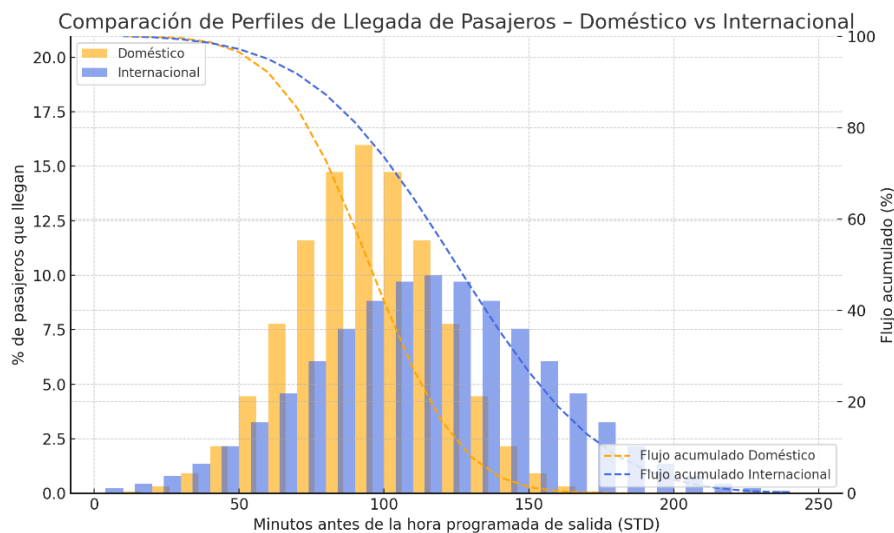


Fig 5. Curva de llegada de pasajeros domestico vs internacional

Fuente: ADRM [3]

Para complementar la información sugerida por IATA en la distribución de llegada de pasajeros, se realiza algunas encuestas a diferentes pasajeros que viajan a destinos nacionales en el aeropuerto José Maria Córdova. Los resultados permiten identificar que cerca del 10% de los pasajeros llega en la franja entre 120 y 90 minutos, luego el 45% llega entre 90 y 60 minutos antes de la salida del vuelo, luego un 40% se presenta entre 60 y 30 minutos de antelación y finalmente un 5% de pasajeros llega entre 30 y 0 minutos antes del embarque. Evidenciando este patrón de la curva de llegada de pasajeros, permite ajustar

toda la planificación y ajustes de recursos que se asignan a las aerolíneas para atender la demanda de sus pasajeros.

Luego de establecer la curva de llegada de los pasajeros al aeropuerto y de segmentar los porcentajes de quienes hacen uso del check-in y aquellos que llegan directo al filtro de seguridad para luego esperar su abordaje, se hace una medición detallada de tiempos de atención del primer proceso de ingreso a salas que son los verificadores de pase de abordar, luego se midieron los tiempos del proceso en inspección en las máquinas de rayos x. Con estas mediciones es posible determinar la capacidad instalada del sistema, dependiendo de la eficiencia observada en cada subproceso.

6.2.1. Medición de tiempos de proceso en verificación de pases de abordar

En este subproceso se analiza el tiempo en que un pasajero es requerido en la verificación del documento de identidad y su pase de abordar. Durante este proceso se invierte un tiempo de atención, el cual restringe el flujo de personas que posteriormente serán inspeccionadas mediante rayos X, con el fin de garantizar la seguridad de las operaciones aéreas.

El enfoque en los estudios de trabajo ayuda a establecer normas de rendimiento de las cuales dependen la planeación y la eficacia de producción o prestación de un servicio[31]. En el presente caso, se busca establecer el valor promedio representativo de atención a los pasajeros, para esto se usa el método estadístico que ayuda a determinar el tamaño de la muestra o el número de observaciones que determinen un nivel de confianza de 95,45 por ciento y un margen de error de $\pm 5 \%$

Ecuación 1 Determinación del tamaño de la muestra

$$n = ((40\sqrt{n'}\sum x^2 - (\sum x)^2)/\sum x)^2 \quad (1)$$

Siendo:

n = tamaño de la muestra que se desea determina

n' = numero de observaciones del estudio preliminar

\sum = suma de los valores

x = valor de las observaciones

n'	150
Σ	1818
Σ^2	22676
n=	47

Tabla 1. Determinación del tamaño total de la muestra en verificadores de documentos

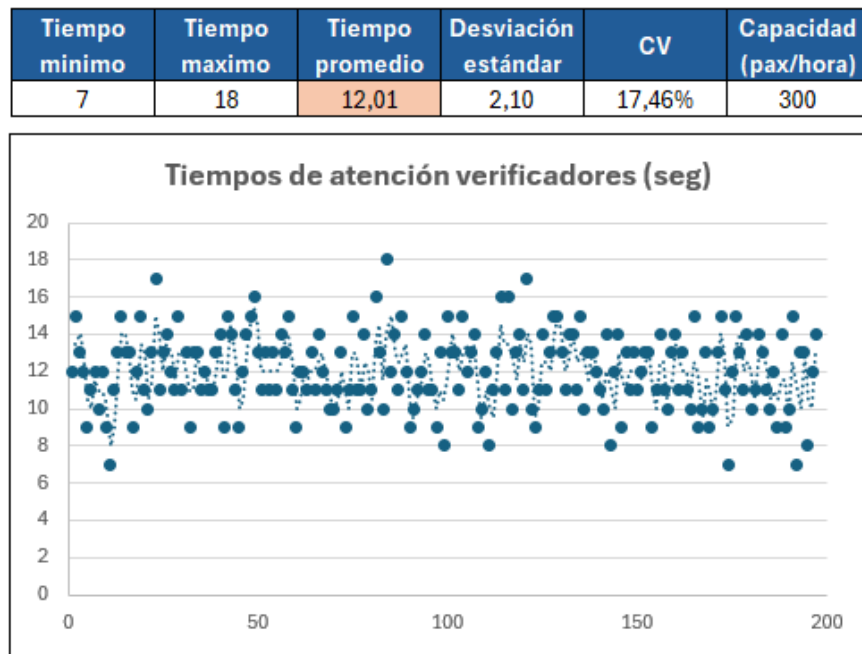


Fig 6. Tiempos de verificación en 197 muestras

Aquí se establecen 150 muestras preliminares del proceso, a partir de las cuales se realiza el cálculo estadístico que determina las muestras faltantes. Dado que los datos de situación con poca dispersión, la ecuación indica que con 47 muestras adicionales se puede alcanzar un nivel de confianza del 95,45 %, lo cual es adecuado para determinar el tiempo promedio estándar del proceso en cada servidor y una capacidad efectiva por verificador promedio de 300 pasajeros por hora.

6.2.2. Medición de tiempos del proceso en inspección con rayos x

En esta etapa, el flujo de pasajeros es determinado por la capacidad de atención del proceso anterior en la verificación de documentos. A pesar de esto, se realiza la observación del proceso y con base en la ecuación estadística para determinar el tamaño total de la muestra, se da inicio con 150 observaciones preliminares en el estudio. Los momentos para realizar la evaluación se da en los picos de operaciones aéreas, estos son los que generan una mayor concentración de pasajeros al ingreso de las salas de abordaje, evidenciando un comportamiento particular, los usuarios tienden a agilizar un poco los movimientos del proceso de desarme y recolección de pertenencias en la inspección de los rayos X en equipajes y arco detector de metales para las personas.

n'	150
Σ	13455,05
Σ^2	1216449,76
$n=$	13

Tabla 2. Determinación del tamaño total de la muestra en inspección por rayos X

Tiempo mínimo (s)	Tiempo máximo (s)	Tiempo promedio (s)	Desviación estándar	CV	Capacidad (pax/hora)
70,98	116,78	90,23	8,14	9,02%	40

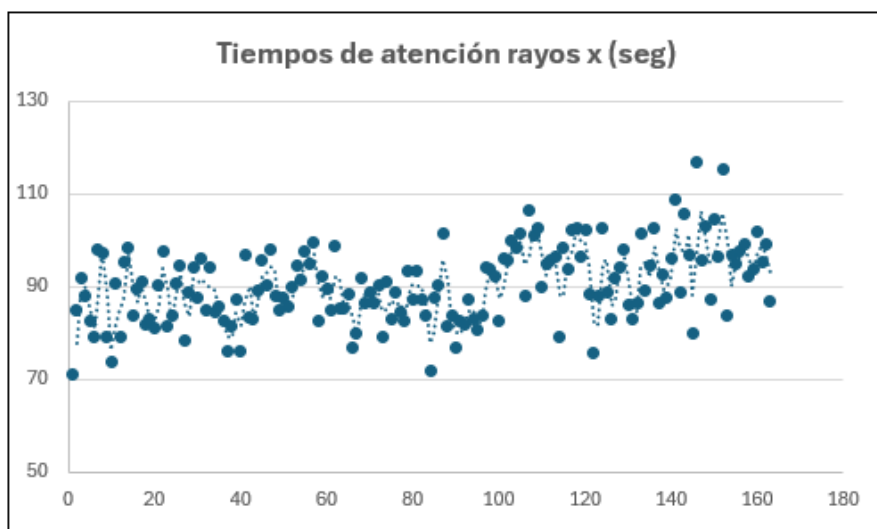


Fig 7. Tiempos de inspección ciclo total con rayos X en 179 muestras

Aquí se establece según la ecuación estadística para determinar un 95.45 % de confianza en los datos, un total de 163 observaciones, los cuales muestran una baja dispersión y un coeficiente de variación de 9.02 % respecto al valor promedio.

En este proceso se presenta una notación para tener en cuenta. aunque el tiempo promedio que un pasajero permanece en el sistema de inspección es de 90,23 segundos, la línea de inspección de rayos x no queda ocupada todo este margen de tiempo para un solo usuario. Durante la fase de desarmé o preparación se genera una fila de pasajeros en la que todos están realizando la misma actividad en simultaneo, demostrando que esta actividad no genera un cuello de botella. La utilización critica del proceso se da en el paso persona a persona por el arco detector y la inspección del equipaje de mano mediante rayos X. Esta actividad si genera un tiempo de proceso individual y establece el ritmo de atención. Evaluada esta consideración y adoptando un enfoque alternativo recomendado para sistemas de espera complejos, se estima que el rendimiento operativo del punto de inspección lo determina principalmente la cantidad efectiva de pasajeros procesados por unidad de tiempo[32].

Min pasajeros 5 minutos	Max pasajeros 5 minutos	Prom pasajeros 5 minutos	Desviación estándar	CV	μ (pax/hora)
12	22	18	2,93	16,30%	216

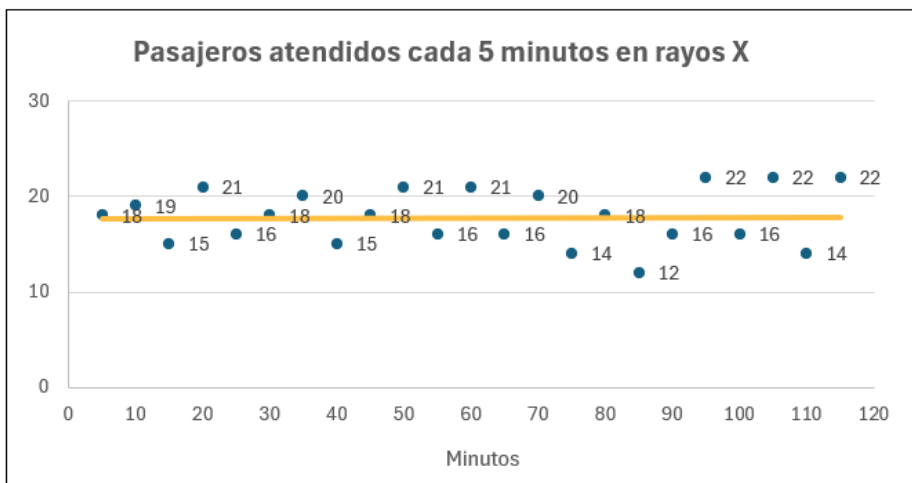


Fig 8. Rendimiento del proceso de inspección de pasajeros con rayos x en franjas de 5 minutos

En resultado a las observaciones en el filtro de seguridad nacional del aeropuerto, se establece un promedio de 18 pasajeros inspeccionados en franjas de 5 minutos. Los valores evidenciados oscilan entre 12 y 22 pasajeros con una desviación estándar de 2,93 y un coeficiente de variación de 16,13 %, esto indica una variabilidad moderada y un proceso estable. Basado en estos números, se determina que el rendimiento de pasajeros inspeccionados por máquina equivale a 216 en una hora. Esta medida se

tomará como el μ (tasa de servicio) para el futuro modelo basado en teoría de colas y simulación de eventos discretos.

6.3. ELABORACIÓN DEL MODELO

6.3.1. Identificar la hora pico en operaciones del aeropuerto

Como punto de partida, es identificar la temporada y el día de la semana que cuenta con mayor demanda de salidas a destinos nacionales. Como referencia del año 2025, se establece la semana del 19 al 25 de mayo del 2025 y el viernes 23 considerado un aforo de 10 operaciones aeroportuarias entre las 14:00 y 15:00 horas.

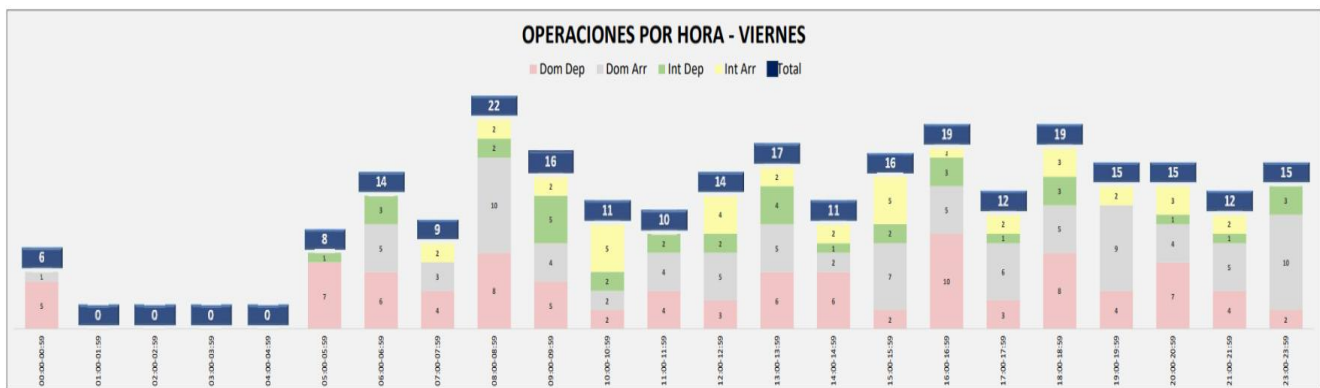


Fig 9. Operaciones combinadas viernes 23 mayo del 2025

Compañía	Vuelo	Fecha Inicio	Día	ORI	DES	STD	Aeronave	Sillas	Pasajeros
AV	9313	23/05/2025	VIERNES	MDE	BOG	16:01	320	180	171
4C	4023	23/05/2025	VIERNES	MDE	BOG	16:02	320	176	167
J6	5134	23/05/2025	VIERNES	MDE	BOG	16:09	320	186	177
P5	7612	23/05/2025	VIERNES	MDE	SMR	16:25	73H	186	177
J6	5436	23/05/2025	VIERNES	MDE	SMR	16:28	320	186	177
AV	9386	23/05/2025	VIERNES	MDE	CTG	16:37	320	180	171
AV	9253	23/05/2025	VIERNES	MDE	CLO	16:44	320	180	171
AV	9510	23/05/2025	VIERNES	MDE	CUC	16:44	320	180	171
AV	8554	23/05/2025	VIERNES	MDE	BAQ	16:55	320	180	171
J6	5123	23/05/2025	VIERNES	MDE	BOG	16:58	320	186	177
									1729

Tabla 3. Hora pico de operaciones y pasajeros saliendo con destinos nacionales

6.3.2. Definir la distribución de llegada de pasajeros

Basado en el análisis a pasajeros con destinos nacionales, se logra identificar los patrones de anticipación a la hora de salida de los vuelos, esto se logra interpretar de la siguiente forma, teniendo en cuenta que los modelos operacionales de la mayoría de aerolíneas que operan dentro de los destinos de Colombia lo hacen bajo el modelo de bajo costo, el cual todo parte desde una tarifa básica y si el pasajero tiene un requerimiento adicional como más espacio en cabina, equipaje de bodega u otros servicios complementarios, se hace un cobro extra. Este modelo está influyendo en la manera en que los pasajeros planifican las llegadas al aeropuerto y prevén sus tiempos de atención en los servicios para su abordaje. Entendiendo esta particularidad de los perfiles de pasajeros nacionales, se establece una medida de llegada estándar para todas las operaciones nacionales. A continuación, se muestra la participación en llegadas con antelación al vuelo.

Distribución llegada pasajeros al aeropuerto			
10%	45%	40%	5%
120-90 min	90-60 min	60-30 min	30-0 min

Tabla 4. Distribución estimada en llegada de pasajeros al aeropuerto José Maria Córdova

6.3.3. Asignar distribución de los pasajeros a los vuelos en hora pico con un LF 95%

Para estimar la cantidad de pasajeros que llegaran al aeropuerto con antelación para hacer uso de los servicios de abordaje, se determinan la cantidad de sillas ofrecidas por las aerolíneas dependiendo la configuración de sus aviones. Luego de esto se determinan factores de ocupación máximo estimado entre de 90% a 95%, para determinar el total de pasajeros que llegaran por vuelo. Luego estos son distribuidos en las diferentes franjas de tiempo que están entre 120 y 30 minutos antes de la hora programada de salida del avión.

6.3.4. Implementación de parámetros en el método en teoría de colas M/M/s

Los modelos de líneas de espera son muy útiles para determinar un balance adecuado entre el costo del servicio y la cantidad de tiempo en espera, proporcionar demasiada capacidad de servicio implica costos excesivos y si no se cuenta con una suficiente capacidad de servicio surgen esperas excesivas que generan disgustos entre los usuarios o pérdidas en oportunidades de atención[32].

Para la formulación del modelo en sistema de atención de pasajeros nacionales en verificación de documentos e inspección por rayos X se da la siguiente notación:

Estado del sistema = Número de pasajeros en verificación e inspección en rayos X

Longitud de la cola = Número de pasajeros esperando a ser atendidos

s = Numero de servidores (verificadores o maquinas rayos X)

λ = Tasa media de llegadas de pasajeros al sistema

μ = Tasa media del servidor

M = Distribución exponencial entre llegadas de pasajeros al sistema

M = Distribución exponencial en atención de pasajeros

Este modelo supone que todos los tiempos entre llegadas son independientes y ubicados dentro de una distribución exponencial dentro de un determinado margen de tiempo como lo es la hora pico seleccionada (proceso de entrada de Poisson), todos los tiempos de servicio son independientes y distribuidos con base en una distribución exponencial y el número de servidores es s (cualquier entero positivo)

Ecuación 2 Tasa de servicio (μ) de verificadores

$$\mu = \frac{N}{\Delta t} \quad (2)$$

Donde:

μ = Tasa de servicio de un verificador (pasajeros por unidad de tiempo)

N = Número de pasajeros atendidos

Δt = Duración del intervalo de observación

$$\mu = \frac{50}{10} = 5 \text{ pasajeros/minuto}$$

$$\mu = 5 \times 60 = 300 \text{ pasajeros/hora}$$

Ecuación 3 Tasa de servicio (μ) de maquina rayos X

$$\mu = \frac{N}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde:

μ = Tasa de servicio de una maquina (pasajeros por unidad de tiempo)

N = Número de pasajeros atendidos

Δt = Duración del intervalo de observación

$$\mu = \frac{38}{10} = 3,8 \text{ pasajeros/minuto}$$

$$\mu = 3,8 \times 60 = 228 \text{ pasajeros/hora}$$

Estabilidad del sistema por subsistema (verificadores/rayos x)

Ecuación 4 Estabilidad del sistema por subsistema (verificadores/rayos x)

$$P = \frac{\lambda}{s\mu} < 1 \quad (4)$$

Donde:

λ = Tasa de llegadas al sistema

s = Numero de servidores disponibles

μ = Tasa de servicio de un servidor

Cuando μ excede la tasa de llegadas λ , el sistema de colas en algún momento lograra la condición de estado estable. En el modelo elaborado se estima la actividad de verificación como un sistema y la actividad de inspección por rayos x como otra actividad independiente.

6.3.5. Simulación de eventos discretos en la llegada de los pasajeros al verificador de documentos e inspección por rayos X.

Para estimar la cantidad de pasajeros que llegan al filtro de seguridad del aeropuerto en zona nacional, se considera un LF (factor de ocupación) de 95% ya que la semana de referencia corresponde a las más altas demandas de pasajeros de la temporada e históricamente su ocupación se establece en este valor. Posteriormente se asigna el LF a la cantidad de asientos ofrecidos según el tipo de aeronave operado comercialmente por la aerolínea, tal como se muestra en la tabla 3.

Posteriormente se genera la llegada aleatoria de cada pasajero al sistema, modelada minuto a minuto, basado en los parámetros de salida programada del vuelo y el tiempo de antelación a este el cual ya registra llegada de pasajeros para la espera del abordaje. Este modelo pretende imitar la distribución momento amonto de llegada de los pasajeros al filtro de seguridad del aeropuerto.

Con este modelo se pretende determinar un balance operativo entre el proceso de verificación de documentos y la inspección de seguridad con rayos X, aquí se evalúa la longitud de la línea de espera en los dos subsistemas y su disciplina.

El orden de atención de los pasajeros sigue una disciplina FIFO, el primero en arribar será el primero en salir del sistema, esto con un dimensionamiento de fila infinito, dado que, en caso de alta afluencia, los pasajeros extenderán su espera en la zona publica del aeropuerto. La longitud de la línea de espera en cada subsistema de determina con la siguiente formula.

Ecuación 5 Longitud de las líneas de espera

$$Lq = \sum_{n=s}^{\infty} (n - s) P_n \quad (5)$$

Los canales de servicio o servidores se contemplan con tiempos idénticos en atención y para el proceso de verificación se tienen disponibles de 1 a 5 funcionarios. En el proceso de inspección mediante equipos de rayos x, se cuenta entre 1 a 6 máquinas con su equipo de profesionales.

7. RESULTADOS

En la simulación de eventos discretos, la cual es basada en teoría de líneas de espera, se evalúan diferentes escenarios que permiten observar los efectos derivados por las tasas de servicio que ofrece cada subsistema dependiendo de la cantidad de servidores disponibles para atender la demanda simulada. Esto permite identificar como los cambios en la capacidad operativa influyen en el desempeño del sistema.

Escenario 1:

2 verificadores de documentos y 3 maquina rayos X

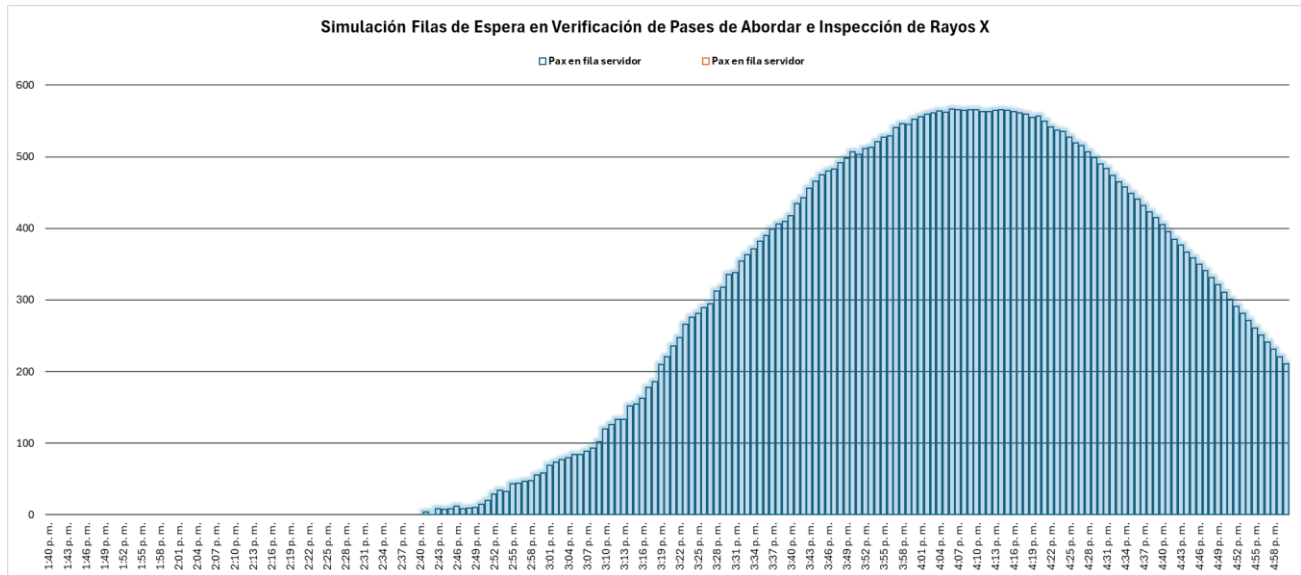


Fig 10. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	0	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0
Pax maximos en fila verificación	567	Minutos fila de filtros con +50 personas	122	Minutos fila de filtros con +80 personas	116	Minutos fila de filtros con +100 personas	112

Fig 11. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

Escenario 2:

2 verificadores de documentos y 2 maquina rayos X

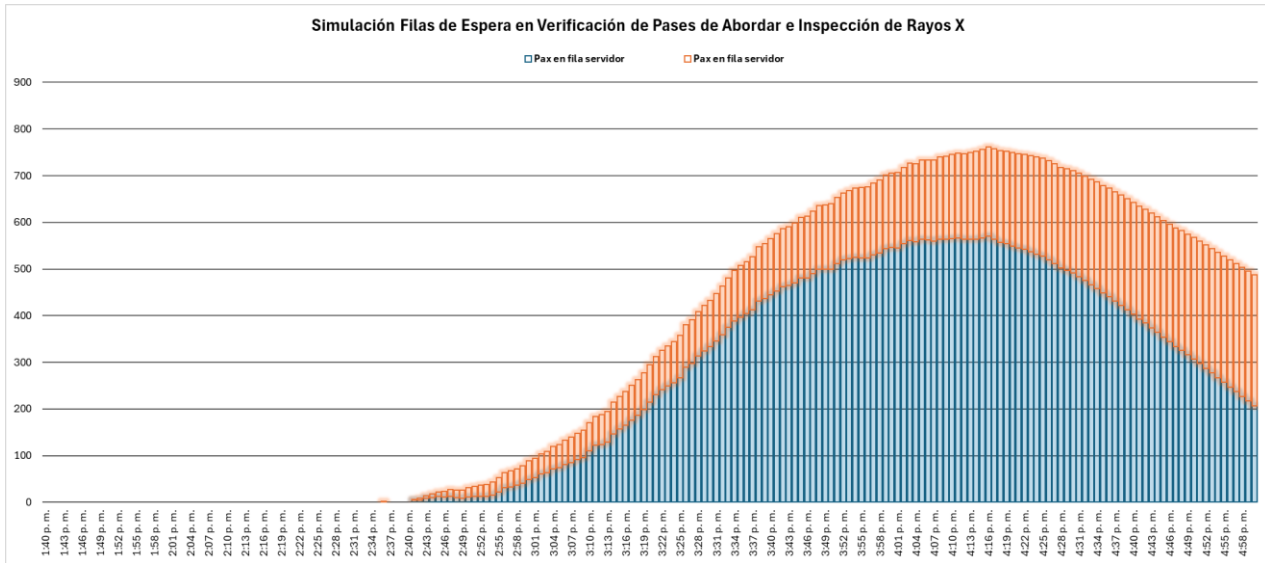


Fig 12. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	280	Minutos fila de filtros con +50 personas	115	Minutos fila de filtros con +80 personas	100	Minutos fila de filtros con +100 personas	90
Pax maximos en fila verificación	570	Minutos fila de filtros con +50 personas	120	Minutos fila de filtros con +80 personas	115	Minutos fila de filtros con +100 personas	111

Fig 13. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

Escenario 3:

3 verificadores de documentos y 4 maquina rayos X

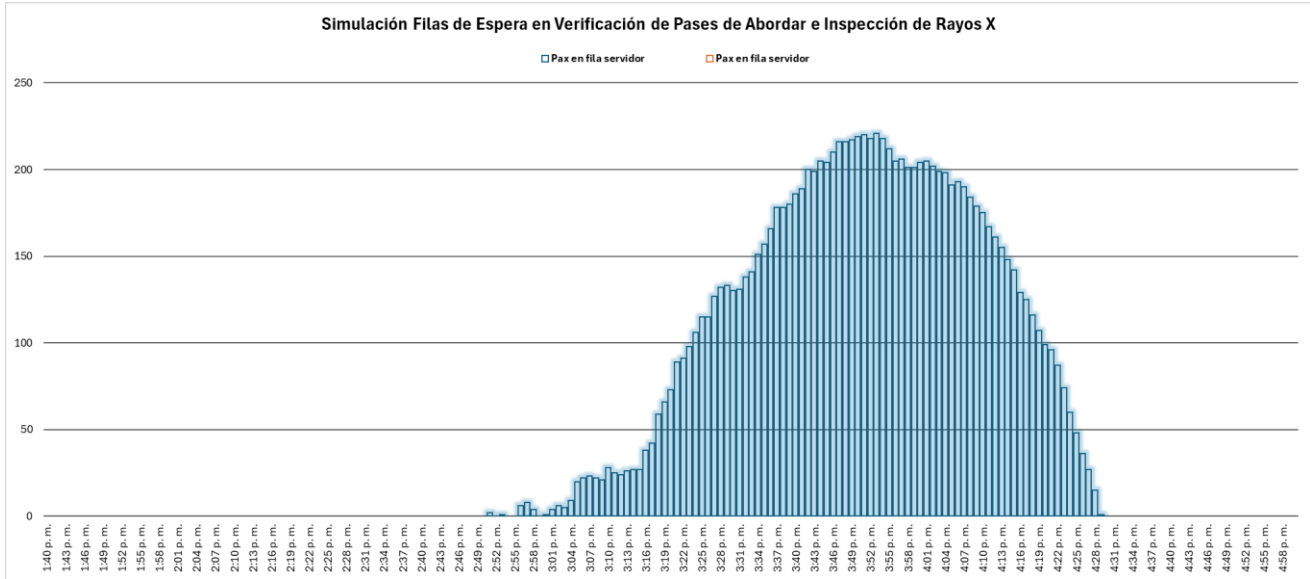


Fig 14. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	0	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0
Pax maximos en fila verificación	221	Minutos fila de filtros con +50 personas	67	Minutos fila de filtros con +80 personas	62	Minutos fila de filtros con +100 personas	56

Fig 15. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

Escenario 4:

4 verificadores de documentos y 4 maquina rayos X

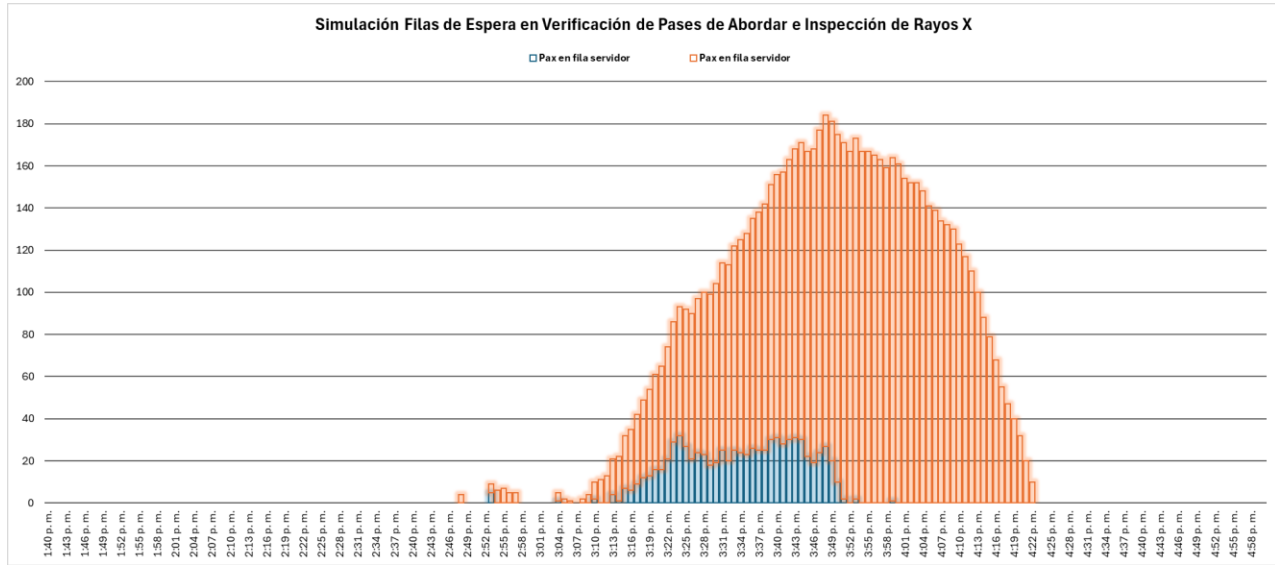


Fig 16. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	171	Minutos fila de filtros con +50 personas	56	Minutos fila de filtros con +80 personas	46	Minutos fila de filtros con +100 personas	39
Pax maximos en fila verificación	32	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0

Fig 17. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

Escenario 4:

4 verificadores de documentos y 5 maquina rayos X

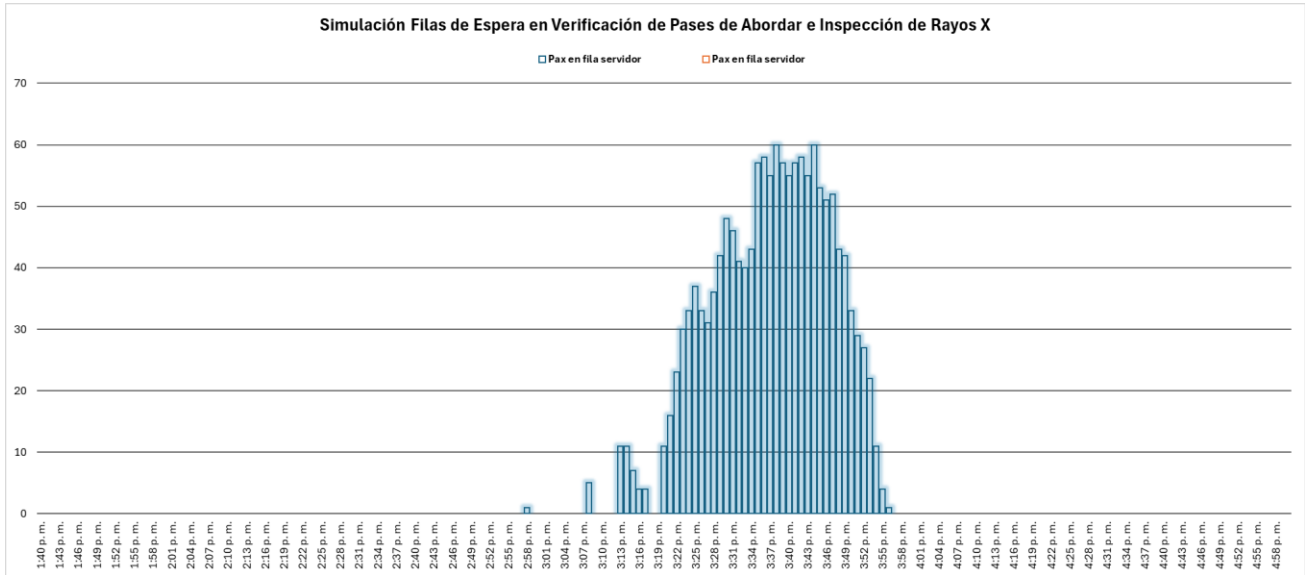


Fig 18. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	0	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0
Pax maximos en fila verificación	60	Minutos fila de filtros con +50 personas	13	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0

Fig 19. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

Escenario 5:

5 verificadores de documentos y 5 maquina rayos X

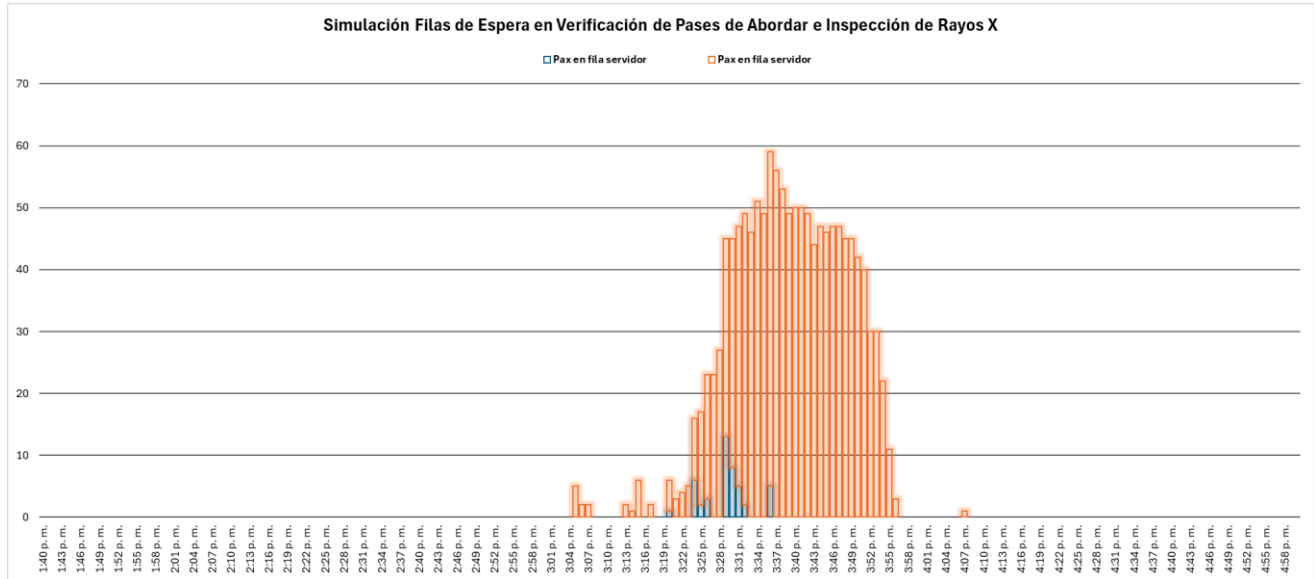


Fig 20. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	56	Minutos fila de filtros con +50 personas	4	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0
Pax maximos en fila verificación	13	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0

Fig 21. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

Escenario 5:

5 verificadores de documentos y 6 maquina rayos X

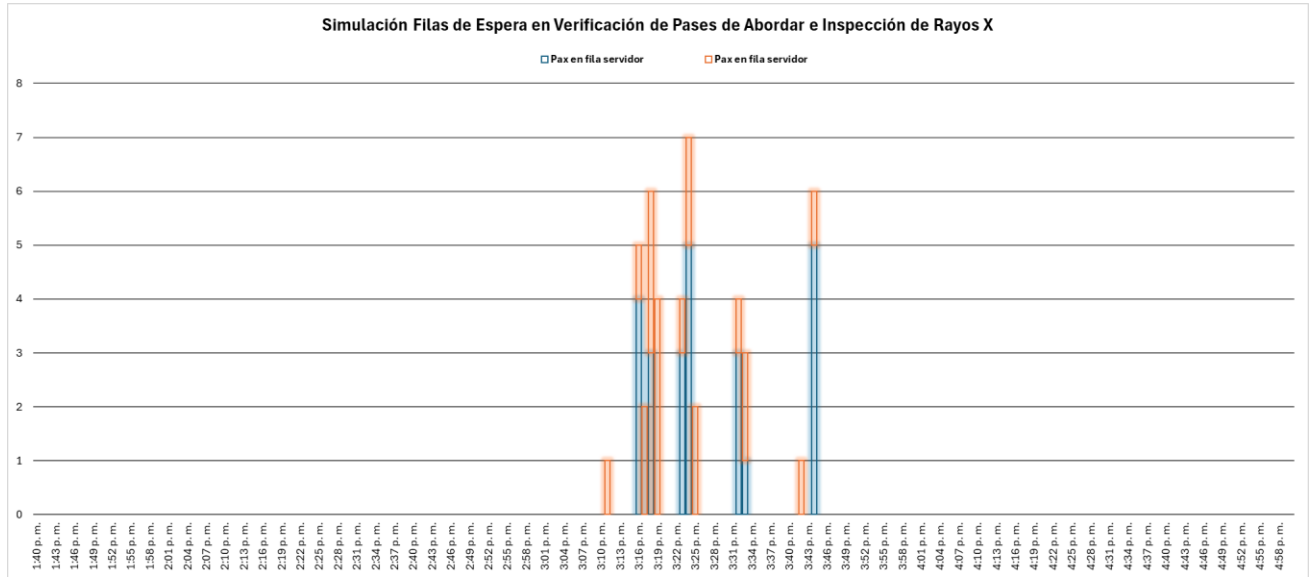


Fig 22. Cantidad de pasajeros en fila de verificación e inspección por rayos X

Pax maximos en fila rayos X	4	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0
Pax maximos en fila verificación	5	Minutos fila de filtros con +50 personas	0	Minutos fila de filtros con +80 personas	0	Minutos fila de filtros con +100 personas	0

Fig 23. Resultados tiempos de espera de los pasajeros

8. CONCLUSIONES

1. Durante la construcción del modelo se logro identificar que la dinámica en llegada de pasajeros al aeropuerto José Maria Córdova tiene alta variabilidad la cual es influenciada por los modelos de operación de las aerolíneas y los flujos que se puedan tener en los pasajeros durante el día. Se observo que el 80% de los pasajeros llegan entre el minuto 100 y 80 antes del vuelo, lo que permite tener un margen suficiente para completar los diferentes procesos que se requiere antes de pasar a las salas de abordaje.

Aunque este patrón de llegadas presenta pocos cambios respecto a lo indicado por la ADRM, se conserva la concentración de pasajeros entre 1 y 2 horas antes del vuelo. Esto da claridad a la hora de realizar asignación de recursos del aeropuerto con las diferentes aerolíneas.

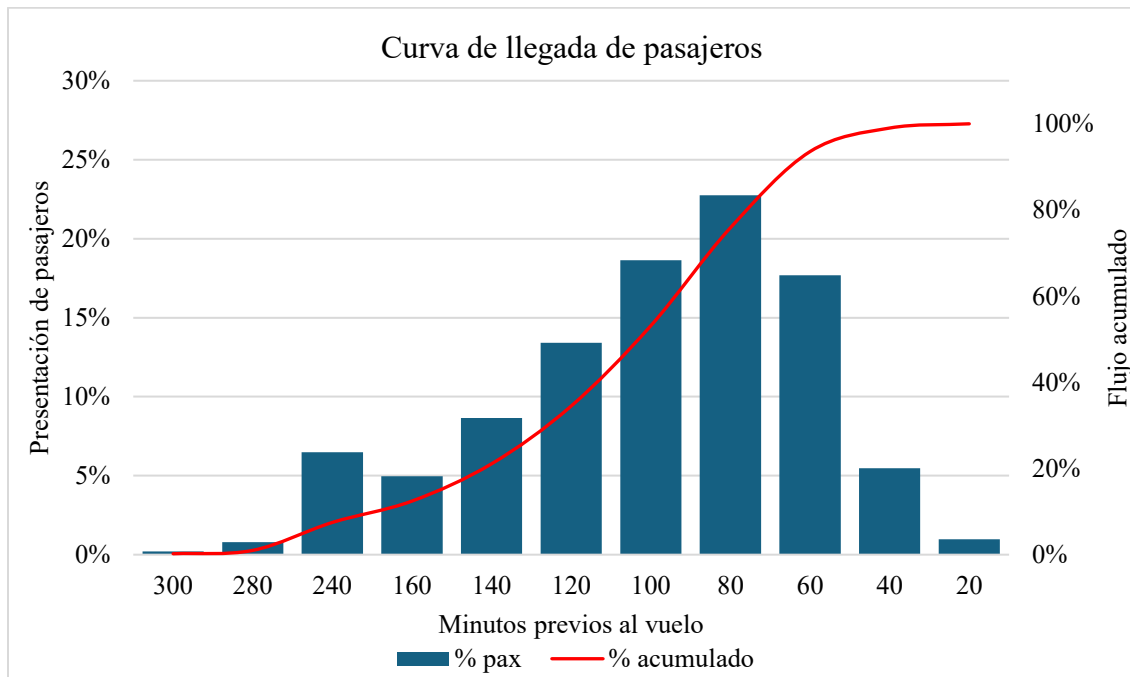


Fig 24. Distribución de llegada de pasajeros al aeropuerto José Maria Córdova

2. Según la literatura en las líneas de espera para garantizar la estabilidad de un sistema se debe cumplir el criterio de dimensionamiento $\lambda < c \cdot \mu$. En esta investigación se evaluaron diferentes escenarios que representan la operación diaria del punto de inspección de pasajeros, considerando que los pasajeros llegan de manera aleatoria a diferentes momentos del día, según la hora de partida del vuelo que tienen programado.

El proceso de inspección con rayos X presenta 3 escenarios de estabilidad, los cuales se dan con la apertura de 5 o 6 máquinas y 3 verificadores de documentos los cuales restringen el flujo de los pasajeros a la línea de espera. La otra estabilidad del sistema se da cuando se apertura 6 máquinas rayos X y el flujo de entrada de pasajeros se regula con 4 verificadores de documentos como se muestra en la siguiente tabla.

Llegadas/mi n	Máquinas rayos X	μ_{rx} (pax/min)	ρ	Estable ($\rho < 1$)
15	1	3,6	4,2	No
15	2	3,6	2,1	No
15	3	3,6	1,4	No
15	4	3,6	1,0	No
15	5	3,6	0,8	Sí
15	6	3,6	0,7	Sí
20	1	3,6	5,6	No
20	2	3,6	2,8	No
20	3	3,6	1,8	No
20	4	3,6	1,4	No
20	5	3,6	1,1	No
20	6	3,6	0,9	Sí
25	1	3,6	6,9	No
25	2	3,6	3,4	No
25	3	3,6	2,3	No
25	4	3,6	1,7	No
25	5	3,6	1,4	No
25	6	3,6	1,2	No

Tabla 5. Estabilidad sistema de rayos x

3. La verificación documental no es el cuello de botella en el terminal, los verificadores de documentos muestran estabilidad, si se generan filas de espera, pero no tan críticos comparados con los que se pueden generar en inspección de rayos X. Las personas que llegan a seleccionar un servidor y lo encuentra ocupado, esta procede a esperar, puede generarse bancos de personas, pero su flujo es considerado y los espacios para esas sillas se reparten a lo largo de la zona pública de circulación del aeropuerto, lo que no genera un colapso de espacio por demanda.

4. La etapa que más limita el desempeño del sistema es la inspección mediante rayos X, este opera muy cerca de su capacidad máxima y por esto se convierte en un cuello de botella del proceso analizado. En el escenario 5, la simulación muestra una acumulación máxima de 56 pasajeros en la fila de rayos X, aquí se recuerda que es una hora pico de flujo de pasajeros por el terminal. Aunque el número de pasajeros en espera parece alto, el tiempo de espera asociado a este es aproximado a 4 minutos, el cual está dentro de los rangos aceptados por la normativa ADRM, los cuales establecen entre 10 y 15 minutos para brindar un óptimo nivel de servicio a un pasajero. Además, estos resultados o escenarios abren la posibilidad de evaluar si en realidad es necesario incorporar una máquina más y que el costo operativo se incremente o se ahorra con la utilización de solo 5, ya que en el aeropuerto se cuenta con un máximo de 5 máquinas para esta actividad.

REFERENCIAS

- [1] R. Stolletz, "Analysis of passenger queues at airport terminals," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 1, no. 1, pp. 144–149, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.rtbm.2011.06.012.
- [2] J. Pivac, I. Štimac, D. Bartulović, and I. Lonjak, "Planning the Airport Terminal Facilities Based on Traffic Demand Forecast and Dominant Share of Airline Business Model: Case Study of Pula Airport," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 5, Mar. 2025, doi: 10.3390/app15052547.
- [3] IATA and ACI, *Airport Development Reference Manual (ADRM)*, 12th ed. Montreal, 2022.
- [4] X. Wen, B. Si, M. Xu, F. Zhao, and R. Jiang, "A passenger flow spatial–temporal distribution model for a passenger transit hub considering node queuing," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 163, p. 104640, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.TRC.2024.104640.
- [5] G. Madkaikar, K. S. M. Yelisetty, S. Sural, J. Vaidya, and V. Atluri, "Performance analysis of dynamic ABAC systems using a queuing theoretic framework," *Comput Secur*, vol. 154, p. 104432, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.COSE.2025.104432.
- [6] A. Brun, E. Feron, S. Alam, and D. Delahaye, "Schedule optimization and staff allocation for airport security checkpoints using guided simulated annealing and integer linear programming," *J Air Transp Manag*, vol. 124, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.jairtraman.2025.102746.
- [7] P. Scala, M. M. Mota, C. L. Wu, and D. Delahaye, "An optimization–simulation closed-loop feedback framework for modeling the airport capacity management problem under uncertainty," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 124, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.trc.2020.102937.
- [8] Nikos. Mastorakis, *Mathematical methods and applied computing : proceedings of the Applied Computing Conference 2009 (ACC '09), proceedings of the 11th International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTEE '09), Vouliagmeni, Athens, Greece, September 28-30, 2009*. WSEAS, 2009.
- [9] L. Adacher and M. Flamini, "Optimizing Airport Land Side Operations: Check-In, Passengers' Migration, and Security Control Processes," 2020, doi: 10.1155/2020/6328016.
- [10] C. T. Poulsen and C. Airports, "Case study: Implementing the IT plat form of the future in Copenhagen Airport MEHDI MOTAGHIANI," 1750.
- [11] C. Liu, Y. R. Chen, Y. Y. Zhang, H. Wang, Q. Luo, and L. Y. Chen, "Reliable and robust scheduling of airport operation resources by simulation optimization feedback and conflict resolution," *Neurocomputing*, vol. 573, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2023.127212.
- [12] N. Berktaş and K. G. Zografos, "Generic model for capacity allocation on transportation terminals," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 196, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.tre.2025.104017.
- [13] N. Metzner, "A comparison of agent-based and discrete event simulation for assessing airport terminal resilience," *Transportation Research Procedia*, vol. 43, pp. 209–218, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.TRPRO.2019.12.035.

- [14] airplan (operadora de aeropuertos centro norte), “Quiénes somos y qué hacemos,” Quienes somos y que hacemos. Accessed: Oct. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.airplan.aero/quienes-somos>
- [15] O. D. Olariaga and L. P. Moreno, “Measurement of airport efficiency. The case of Colombia,” *Transport and Telecommunication*, vol. 20, no. 1, pp. 40–51, 2019, doi: 10.2478/ttj-2019-0004.
- [16] “Así nos fue en 2024 | Airplan.” Accessed: Apr. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.airplan.aero/noticias/asi-nos-fue-en-2024-airplan>
- [17] J. Felix and E. Saucedo, “Effects of macroeconomic variables on domestic passenger airlines: Evidence from low-cost and full-service carriers in Mexico,” *Research in Transportation Business and Management*, vol. 63, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101475.
- [18] S. AlKheder, S. Alhadayah, and Z. Albaghli, “Simulation modeling of passengers flow at airport terminals to reduce delay and enhance level of service,” *Case Stud Transp Policy*, vol. 18, p. 101312, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.CSTP.2024.101312.
- [19] I. E. Manataki and K. G. Zografos, “A generic system dynamics based tool for airport terminal performance analysis,” *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 17, no. 4, pp. 428–443, 2009, doi: 10.1016/j.trc.2009.02.001.
- [20] J. Li, Y. Zhang, S. Cheng, Q. Luo, and W. Dang, “A choice model of security check channel for airline passengers considering heterogeneity in airport terminal,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 624, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.physa.2023.128930.
- [21] S. Alodhaibi, R. L. Burdett, and P. K. D. V. Yarlagadda, “Impact of Passenger-Arrival Patterns in Outbound Processes of Airports,” *Procedia Manuf*, vol. 30, pp. 323–330, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.046.
- [22] E. Yucesan, H. J. Chen L Snowdon, and A. Verbraeck Edwin Valentin, “Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference SIMULATION BUILDING BLOCKS FOR AIRPORT TERMINAL MODELING.”
- [23] J. Park and I. Moon, “Pricing strategies in an M/G/m/m loss system: A case study of Incheon International Airport customer services,” *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 192, p. 103821, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.TRE.2024.103821.
- [24] “iata-level-of-service-paper-best-practice (IATA)”.
- [25] M. Wang, “Application of the Queuing Theory in Characterizing and Optimizing the Passenger Flow at the Airport Security,” *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 05, no. 09, pp. 1620–1628, 2017, doi: 10.4236/jamp.2017.59134.
- [26] A. Nõmmik and D. Antov, “Modelling Regional Airport Terminal Capacity,” *Procedia Eng*, vol. 178, pp. 427–434, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.01.083.
- [27] C. Oprea *et al.*, “Analyzing Passenger Flows in an Airport Terminal: A Discrete Simulation Model,” *Computation*, vol. 12, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/computation12110223.
- [28] J. Pivac, I. Štimac, D. Bartulović, and A. Vidović, “Determining the Optimal Level of Service of the Airport Passenger Terminal for Low-Cost Carriers Using the Analytical Hierarchy Process,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2025, doi: 10.3390/app15041734.

- [29] J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson, D. M. Nicol, W. J. Fabrycky, and J. H. Mize, "Discrete-Event System Simulation FOURTH EDITION PRENTICE-HALL INTERNATIONAL SERIES IN INDUSTRIAL AND SYSTEMS ENGINEERING."
- [30] J. A. Restrepo-Morales, E. A. G. Betancur, and J. G. V. López, "Customer service multichannel model in a health care service provider: A discrete simulation case study," *Innovar*, vol. 29, no. 72, pp. 89–102, Apr. 2019, doi: 10.15446/innovar.v29n72.77934.
- [31] Oficina Internacional del Trabajo (OIT), "introduccion-al-estudio-del-trabajo-oit," vol. 4, 1996.
- [32] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introducción a la investigación de operaciones*, 9th ed. Mexico: McGraw-Hill, 2010.

ANEXOS

Como fundamento del trabajo realizado, se anexa con este el archivo en Excel de la simulación.