

**MODELO DE EVALUACIÓN DE INFRAESTRUCTURA Y OPERACIÓN
DE AEROPUERTOS COMERCIALES REGULADOS POR LA
ADMINISTRACIÓN FEDERAL DE AVIACIÓN: ESTUDIO DE CASO DEL
AEROPUERTO INTERNACIONAL LUIS MUÑOZ MARÍN**

Por

José Alberto Silvestre Soto

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN

INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO

RECINTO DE MAYAGÜEZ

2014

Aprobado por:

Ivette Cruzado Vélez, Ph.D.

Presidente, Comité Graduado

Fecha

Didier M. Valdés Díaz, Ph.D.

Miembro, Comité Graduado

Fecha

Mayra I. Méndez Piñero, Ph.D.

Miembro, Comité Graduado

Fecha

Ismael Pagán Trinidad, M.S.C.E

Director del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura

Fecha

Leyda León, Ph.D.

Representante de Estudios Graduados

Fecha

ABSTRACT

A number of methodologies have been developed to assess transportation infrastructure. However, a standard methodology for evaluating airports operational infrastructure does not exist yet. Airports infrastructure factors and elements necessary to conduct an operational evaluation were identified in this research. An evaluation matrix model was developed, in which a weights percentage was assigned to each identified infrastructure aspect. The evaluation model was calibrated conducting a case study of the Luis Muñoz Marín International Airport (SJU). The Federal Aviation Administration (FAA) and Airports Cooperative Research Program (ACRP) design guidelines and evaluation scales were some of the evaluation metrics used in this research. SIMIO simulation models of the SJU airport, Terminal A processes, were developed to be able to evaluate high season demand scenarios. The evaluation model permitted to identify deficiencies in the SJU airport infrastructure and operations. Results indicate that SJU airport is capable of satisfying the existing demand with an acceptable level of service. Future research has to be focused in different airports aspects, like the Navigation Airspace System, to investigate the basis of the SJU airport annual delays.

RESUMEN

Un sinnúmero de metodologías se han desarrollado para la evaluación de infraestructura de transportación. Sin embargo, no existe una metodología estándar para la evaluación de la infraestructura y operación de los sistemas de transporte comercial aéreo. Los factores y elementos de infraestructura necesarios para evaluar la operación de un aeropuerto son identificados mediante esta investigación. Se desarrolló un modelo de evaluación tipo matriz en el cual se asignan pesos porcentuales a los aspectos de infraestructura y operación identificados en la literatura. La calibración del modelo se llevó a cabo mediante el estudio de caso del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (SJU). Las guías de diseño y las escalas de evaluación de la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) y el Programa de Investigación Cooperativa de Aeropuertos (ACRP, por sus siglas en inglés) son algunas de las métricas de evaluación utilizadas en esta investigación. Modelos de simulación en el programa SIMIO, de los procesos en el Terminal A del aeropuerto SJU, permitieron la evaluación de escenarios en temporada de alta demanda del aeropuerto. El modelo de evaluación permitió identificar deficiencias en la infraestructura y operación del aeropuerto SJU. Según los resultados de la evaluación, el aeropuerto SJU tiene la capacidad de satisfacer la demanda existente a un nivel de servicio aceptable. Investigaciones futuras deben enfocarse en la evaluación de aspectos adicionales, como por ejemplo el sistema de navegación aéreo utilizado, para determinar la raíz de las demoras que ocurren actualmente en el aeropuerto SJU.

Dedicado a:

Mi hija, mi esposa y mis padres.

Gracias por confiar en mí, brindándome su apoyo incondicional.

Sin ustedes no lo hubiese logrado.

Gracias Dios...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por enseñarme a perseverar y lograr lo que me proponga. A mi hija y esposa por darme el apoyo y la motivación para continuar aún cuando las cosas no salen como planeado. A mi amigo y consejero Carlos Calero Valenzuela por ser ejemplo a seguir con sus palabras y actos.

Agradezco a la Dra. Ivette Cruzado por darme la oportunidad de realizar esta investigación y servirme de consejera en el camino a la culminación de esta etapa de mi carrera. A la Autoridad para las Alianzas Público Privadas de Puerto Rico y el Programa de Becas en Transportación Dwight David Eisenhower de la Administración Federal de Carreteras por proveer los fondos que permitieron la realización de esta investigación. A la Autoridad de los Puertos de Puerto Rico y los empleados del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín por su constante apoyo en la recopilación de datos e información requerida; sin ustedes no hubiese sido posible cumplir con los objetivos de este estudio. Y al Recinto Universitario de Mayagüez por la ayuda recibida.

Gracias a mi familia, amigos y a todos los que de una forma u otra fueron parte de este logro académico, profesional y personal.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Trasfondo	1
1.2 Problema de Investigación.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Alcance	4
1.5 Beneficios Esperados	6
1.6 Organización de la Tesis.....	6
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y DATOS PRELIMINARES	8
2.1 Flujograma de Metodología.....	8
2.2 Datos para la Evaluación de Infraestructura del Aeropuerto SJU	9
2.2.1 Zona Terrestre	10
2.2.2 Zona Terminal.....	11
2.2.3 Zona Aérea	12
CAPÍTULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	14
3.1 Nivel de Servicio en Aeropuertos.....	14
3.1.1 Definiciones de Nivel de Servicio.....	14
3.1.2 Modelos y Metodologías.....	16
3.2 Factores Identificados para la Evaluación de Infraestructura de Aeropuertos	18
3.2.1 Zona Terrestre	18
3.2.2 Zona Terminal.....	19
3.2.3 Zona Aérea	21
3.2.4 Infraestructura de Aeropuertos.....	22
3.3 Evaluación de Infraestructura de Estados Unidos	25
3.4 Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín de Puerto Rico	28
3.4.1 Localización y Código de Referencia	28
3.4.2 Configuración del Aeropuerto.....	30
3.4.3 Operación y Demoras.....	31
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO DE EVALUACIÓN DE AEROPUERTOS... ..	32
4.1 Matriz para Tamizar Ideas	32
4.2 Zonas de Evaluación.....	33
4.3 Modelo de Evaluación	35

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE AEROPUERTOS.....	38
5.1 Zona Terrestre.....	38
5.1.1 Acceso al Aeropuerto.....	39
5.1.2 Acceso al Edificio Terminal.....	40
5.2 Zona Terminal.....	45
5.2.1 Procesamiento de Pasajeros	45
5.2.2 Influencias Adicionales en un Terminal.....	58
5.3 Zona Aérea.....	62
5.3.1 Configuración y Geometría del Aeropuerto.....	62
5.3.2 Tiempos de Ocupación.....	76
CAPÍTULO 6. ESTUDIO DE CASO: EVALUACIÓN DEL AEROPUERTO SJU	81
6.1 Evaluación de la Zona Terrestre	81
6.1.1 Evaluación de Acceso al Aeropuerto SJU.....	81
6.1.2 Evaluación de Acceso al Edificio Terminal.....	83
6.2 Evaluación de la Zona Terminal.....	87
6.2.1 Terminal A del Aeropuerto SJU	87
6.2.2 Evaluación de Procesos en el Terminal.....	88
6.2.3 Evaluación de Influencias Adicionales del Terminal.....	109
6.3 Evaluación de Zona Aérea.....	111
6.3.1 Configuración y Geometría del Aeropuerto SJU	112
6.3.2 Tiempos de Ocupación.....	125
6.4 Resumen de Resultados	127
6.4.1 Zona Terrestre	128
6.4.2 Zona Terminal.....	129
6.4.3 Zona Aérea	130
6.4.4 Zonas Acumuladas de Forma Ponderada	131
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	132
7.1 Conclusiones.....	132
7.1.1 Modelo y Metodología de Evaluación de Infraestructura y Operación de Aeropuertos	132
7.1.2 Evaluación del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín	134
7.2 Recomendaciones	136
REFERENCIAS.....	140
APÉNDICES.....	144
Apéndice A - Acrónimos	144

Apéndice B - Definiciones.....	146
Apéndice C – Proceso de selección de distribuciones por proceso muestreado.....	148
I. Registro de pasajeros con empleado	148
II. Registro en kioscos (máquinas de auto-registro)	151
III. Entrega de equipaje	154
IV. Revisión de seguridad	157

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Estadística descriptivas de datos de tiempo entre llegadas para los procesos en el Terminal A del aeropuerto SJU	11
Tabla 2.2 Estadística descriptivas de datos de tiempo de servicio obtenidos	11
Tabla 2.3 Número de asientos y área de espera disponibles en las salidas del Terminal A en el Aeropuertos SJU	12
Tabla 2.4 Estadística descriptivas de datos de tiempo de ocupación.....	13
Tabla 3.1 Nivel de servicio definido por <i>Transport Canada</i> (1979)	15
Tabla 3.2 Escala de nivel de servicio para el tiempo de espera en el proceso de registro con empleado (Correia y Wirachinghe, 2006).....	17
Tabla 3.3 Factores de nivel de servicio para la zona terrestre (Brinke y Madison, 1975).....	19
Tabla 3.4 Factores de nivel de servicio para la zona terminal (Brinke y Madison, 1975)	20
Tabla 3.5 Distribución de demoras de llegadas por causa en los aeropuertos de Estados Unidos (BTS, 2013).....	28
Tabla 3.6 Categoría del aeropuerto según la velocidad de aproximación de las Aeronaves (FAA, 2012)	29
Tabla 3.7 Clasificación de aeropuertos según la altura de la cola y la longitud de alas del avión típico de mayor envergadura en el aeropuerto (ACRP, 2010).....	30
Figura 4.1 Matriz para tamizar ideas (Nieves, 2003).....	33
Tabla 4.2 Método de evaluación.....	36
Tabla 4.3 Modelo de evaluación de infraestructura y operación de aeropuertos.....	37
Tabla 5.1 Puntuación para la evaluación de modos de transporte disponibles en el aeropuerto ..	39
Tabla 5.2 Distribución de puntos para la evaluación de rutas de acceso al aeropuerto	40
Tabla 5.3 Distribución de puntos asignados a la evaluación del estacionamiento de un aeropuerto	42
Tabla 5.4 Dimensiones recomendadas por la FAA para el encintado frente al Terminal A	44
Tabla 5.5 Elementos evaluados para las instalaciones peatonales de la zona terrestre	45
Tabla 5.6 Datos por grupo o individual para tiempo de procesamiento de pasajeros (ACRP, 2008)	47
Tabla 5.7 Valores de Z para distintos niveles de confianza.....	48
Tabla 5.8 Desglose de condiciones evaluadas para determinar diferencia significativa	51

Tabla 5.9 Nivel de servicio del tiempo de espera y tiempo de servicio en.....	52
Tabla 5.10 Resumen de dimensiones recomendadas para los procesos	54
Tabla 5.11 División de puntos asignados por dimensiones para los procesos de registro, entrega de equipaje y revisión de seguridad.....	55
Tabla 5.12 Nivel de servicio para número de asientos y área de espera disponible por salida	62
Tabla 5.13 Modelo de evaluación para la configuración y geometría de la zona aérea	64
Tabla 5.14 capacidad de pistas según su configuración (Vázquez et. al., 2011).....	65
Tabla 5.15 Composición de flota (ACRP, 2010).....	69
Tabla 5.16 Nivel de servicio y puntuación para la razón de demanda determinada.....	71
Tabla 5.17 Clasificación de aeropuertos según la longitud máxima de alas de avión típico (PRPA, 1995).....	71
Tabla 5.18 Categoría del aeropuerto según la velocidad de aproximación de las aeronaves (FAA, 2012)	71
Tabla 5.19 Puntuación asignada por la configuración de salidas de pista del aeropuerto evaluado	73
Tabla 5.20 Puntuación asignada a la utilización de salidas de pista de alta velocidad.....	73
Tabla 5.21 Puntuación asignada la evaluación de la calle de rodaje paralela a la pista	74
Tabla 5.22 Puntuación asignada la evaluación de dimensiones requeridas de calles de rodaje por avión típico de mayor envergadura y la inclusión de giros de alta velocidad	74
Tabla 5.23 Puntuación asignada a la evaluación de calles de rodaje que atraviesan una pista activa.....	75
Tabla 5.24 Puntuación asignada a la evaluación del área de almacenamiento temporero	76
Tabla 5.25 Modelo de evaluación para los tiempos de ocupación de la zona aérea.....	77
Tabla 5.26 Escala de evaluación de tiempo de ocupación de pista	78
Tabla 5.27 Escala de evaluación de tiempo de ocupación para calles de rodaje que atraviesan una pista activa.....	79
Tabla 5.28 Escala de evaluación de tiempo de ocupación en plataforma.....	80
Tabla 6.1 Modelo de evaluación de la zona terrestre en el aeropuerto SJU	81
Tabla 6.2 Evaluación de Rutas de Acceso al Aeropuerto SJU	82
Tabla 6.3 Puntuación obtenida por los elementos de encintado evaluados en el Terminal A del aeropuerto SJU.....	85

Tabla 6.4 Elementos evaluados para las instalaciones.....	86
Tabla 6.5 Resultados de evaluación del Terminal A del aeropuerto SJU.....	87
Tabla 6.6 Pruebas de bondad de ajuste Kolmogorof-Smirnov y Chi-cuadrada (Bartolomei, 2011)	90
Tabla 6.7 Estadística descriptiva de los datos de tiempo entre llegadas.....	91
Tabla 6.8. Estadística descriptiva de los datos de tiempo de servicio para los procesos analizados	91
Tabla 6.9 Distribuciones analizadas para los datos de tiempo entre llegadas en el proceso de registro de pasajeros con un empleado	93
Tabla 6.10 Distribuciones analizadas para los datos de tiempo de servicio en el proceso de registro de pasajeros con un empleado	93
Tabla 6.11 Distribuciones escogidas para el tiempo entre llegadas de cada proceso evaluado en el Terminal A.....	95
Tabla 6.12 Distribuciones escogidas para el tiempo de servicio de cada proceso evaluado en el Terminal A.....	95
Tabla 6.13 Capacidad de servicio actual de pasajeros o grupos	96
Tabla 6.14 Resultados del modelo de simulación creado para el proceso de registro de pasajeros con empleado (<i>SIMIO</i>).....	99
Tabla 6.15 Porcentaje de error entre el total de pasajeros que llegó en el periodo de estudio y el promedio de pasajeros que llega en cada modelo para este mismo periodo.....	100
Tabla 6.16 Porcentaje de error entre el tiempo promedio de servicio de los datos y el tiempo promedio de servicio obtenido en cada modelo para este mismo periodo	100
Tabla 6.17 Resultados de simulación de situación actual del Terminal A en el aeropuerto SJU	101
Tabla 6.18 Número de pasajeros generados para la demanda estimada en la hora pico de la temporada alta en el terminal A del aeropuerto SJU	102
Tabla 6.19 Resultados de proyección de demanda en los modelos utilizando los recursos existentes.....	103
Tabla 6.20 Resultados de proyección de demanda en los modelos utilizando los recursos necesarios para ofrecer un nivel de servicio satisfactorio.....	103

Tabla 6.21 Nivel de servicio y puntuación asignada al tiempo de espera para cada proceso evaluado para la demanda estimada periodo de alta demanda	104
Tabla 6.22 Nivel de servicio y puntuación asignada al tiempo promedio de servicio obtenido para los datos recolectados.....	105
Tabla 6.23 Nivel de servicio y puntuación asignada al número de pasajeros en fila para cada proceso evaluado para la demanda estimada en temporada alta.....	105
Tabla 6.24 Dimensiones recomendadas por la ACRP y dimensiones medidas para los procesos en el Terminal A del aeropuerto SJU.....	106
Tabla 6.25 Puntuación obtenida para los espacios de los procesos de registro con empleado, entrega de equipaje y revisión de seguridad	107
Tabla 6.26 Evaluación de características	110
Tabla 6.27 Dimensiones recomendadas para salidas de terminales y dimensiones medidas en el Terminal A del aeropuerto SJU	110
Tabla 6.28 Número de asientos y área de espera por salida del Terminal A en el aeropuerto SJU	111
Tabla 6.29 Resultados de evaluación de zona aérea del aeropuerto SJU	111
Tabla 6.30 Total de operaciones por mes para el año fiscal 2011 en el aeropuerto internacional Luis Muñoz Marín (Autoridad de los Puertos de Puerto Rico, 2011)	112
Tabla 6.31 Índices de mezcla del aeropuerto SJU	113
Tabla 6.32 Resultados de evaluación de la zona aérea del aeropuerto SJU	128
Tabla 7.1 Deficiencias encontradas y alternativas de mitigación para el aeropuerto SJU	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de procesos en un aeropuerto para un vuelo doméstico (ACRP, 2010)	5
Figura 2.1 Flujograma de la metodología de investigación	9
Figura 3.1 Regresión lineal de tiempos de espera en proceso de registro con empleado (Correia y Wirasinghe, 2006).....	16
Figura 3.2 Percepción de los pasajeros de las variables de procesamiento (Martel y Seneviratne, 1990)	21
Figura 3.3 Diagrama de la configuración más común para aeropuertos (ACRP, 2010)	23
Figura 3.4 Calificación de infraestructura de Estados Unidos (ASCE, 2013).....	26
Figura 3.5 Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (Google, 2013)	29
Figura 5.1 Número de estacionamientos en una muestra de aeropuertos por el número de pasajeros embarcados anualmente (FAA, 1988)	41
Figura 5.2 Dimensiones recomendadas por la FAA para encintado de aeropuertos de mediana y alta capacidad (ACRP, 2010).....	43
Figura 5.3 Dimensiones recomendadas para la configuración más	53
Figura 5.4 Dimensiones recomendadas para las diferentes configuraciones.....	54
Figura 5.5 Dimensiones recomendadas para la configuración típica del proceso	55
Figura 5.6 Dimensiones recomendadas para los sistemas típicos de reclamo de equipaje (ACRP, 2010)	57
Figura 5.7 Efecto de objetos en el ancho efectivo de un pasillo principal de terminal	60
Figura 5.8 Dimensiones recomendadas para configuración de salidas.....	61
Figura 5.9 Ejemplo de las configuraciones disponibles en el Nivel 1	66
Figura 5.10 Gráfica y homógrafo para el análisis de capacidad	67
Figura 5.11 Pantalla de modelo ACM para análisis de capacidad de aeropuertos (ACRP, 2012)	67
Figura 5.12 Estimado de demora promedio por avión (FAA, 1983).....	70
Figura 6.1 Carreteras de acceso a la zona comercial del aeropuerto SJU.....	82
Figura 6.2 Carriles de acceso y distancia entre entradas al Terminal A del aeropuerto SJU	84
Figura 6.3. Terminal A del aeropuerto SJU de ancho de acera menor a los 12 pies recomendados	85
Figura 6.4 Terminal A del aeropuerto SJU (antes de ser remodelado).....	88

Figura 6.5 Histograma de datos de tiempo entre llegadas para el proceso de registro con empleado (<i>Stat fit</i>).....	92
Figura 6.6 Histograma de datos de tiempo de servicio para el proceso de registro con empleado	92
Figura 6.7 Gráfica de distribución escogida para la muestra de datos de tiempo entre llegadas en el proceso de registro con empleado (<i>Stat fit</i>).....	94
Figura 6.8. Gráfica de distribución escogida para la muestra de datos de tiempo de servicio en el proceso de registro con empleado (<i>Stat fit</i>).....	94
Figura 6.9 Configuración del modelo de simulación para el proceso de registro de pasajeros con un empleado (<i>SIMIO</i>)	96
Figura 6.10 Instante de animación del modelo de simulación desarrollado para el proceso de entrega de equipaje (<i>SIMIO</i>).....	97
Figura 6.11 Instante de animación del modelo de simulación desarrollado para el proceso de registro de pasajeros en Kioscos de auto-registro (<i>SIMIO</i>)	98
Figura 6.12 Instante de animación del modelo de simulación desarrollado para el proceso de revisión de seguridad (<i>SIMIO</i>).....	98
Figura 6.13 Dimensiones recomendadas por la ACRP para el sistema de reclamo de equipaje utilizado en el Terminal A del aeropuerto SJU (ACRP,2010).....	107
Figura 6.14 Dimensiones medidas del sistema de reclamo de equipaje utilizado en el terminal A del aeropuerto SJU	108
Figura 6.15 Largo de pista requerido para el despegue de un avión Airbus 340-200 en el aeropuerto SJU (Airbus, 1992)	115
Figura 6.16 Largo de pista requerido para el aterrizaje de un avión Airbus 340-200 en el aeropuerto SJU (Airbus, 1992)	116
Figura 6.17 Velocidad de aproximación del avión Airbus 340-200 en base al peso bruto (Airbus, 1992)	117
Figura 6.18 Radio mínimo necesario para un giro de 90 grados de un avión A340-200 desde una pista de 150 pies de ancho hasta una calle de rodaje de 75 pies de ancho (Airbus, 1992) ..	120
Figura 6.19 Radio mínimo necesario para un giro de 135 grados de un avión A340-200 desde una pista de 150 pies de ancho hasta una calle de rodaje de 75 pies de ancho (Airbus, 1992) ..	121

Figura 6.20 Radio mínimo necesario para un giro de 180 grados de un avión A340-200 en una pista de 150 pies de ancho (Airbus, 1992).....	122
Figura 6.21. Ubicación de áreas de almacenamiento temporero de las pistas del aeropuerto SJU	125

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se ofrece un trasfondo de la investigación, enfocado en la infraestructura de aeropuertos y los beneficios de una evaluación periódica. Se define el problema de investigación, los objetivos, el alcance y los beneficios esperados de esta tesis.

1.1 Tránsito

La infraestructura se define básicamente como el conjunto de instalaciones y servicios necesarios para el funcionamiento de una comunidad o sociedad (ASCE, 2009). La infraestructura física es generalmente diseñada, construida y mantenida por el estado y por tal razón es igualmente conocida como infraestructura urbana u obras públicas. Las obras públicas se clasifican en distintas áreas, tales como:

- transporte (carreteras, puertos, aeropuertos, sistema de transporte público),
- energía (plantas energéticas, redes de distribución de energía),
- hidráulica (recursos de agua, plantas de tratamiento de aguas, alcantarillado), y
- telecomunicaciones (telefonía, circuitos cerrados de televisión).

Uno de los objetivos principales de la planificación y el mantenimiento de infraestructuras es mejorar, o al menos mantener, un nivel de rendimiento y/o servicio específico. Para alcanzar este objetivo es necesario identificar y evaluar los aspectos que afectan el desempeño de las estructuras. Las evaluaciones a infraestructuras sirven como una buena justificación para incorporar mejoras y medir cambios en el nivel de servicio obtenido (Correia y Wirasinghe, 2006). Es por esto que se han desarrollado un sinnúmero de metodologías para la evaluación de infraestructuras en las distintas áreas de la ingeniería civil. El informe 677 del Programa Nacional Cooperativo de Investigación en Carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés) y el informe 100 del Programa de Investigación en Transporte Colectivo (TCRP, por sus siglas en inglés) son ejemplo de metodologías desarrolladas para la designación de niveles de servicio a sistemas de carreteras y transporte masivo.

El nivel de servicio y la capacidad en aeropuertos han sido tópicos de interés por las pasadas dos décadas. Estudios recientes se han llevado a cabo para identificar deficiencias en infraestructura, capacidad y medidas de servicio en aeropuertos. Sin embargo, la obtención de un nivel de servicio para aeropuertos se encuentra en etapas iniciales de investigación en

comparación, por ejemplo, con el nivel de profundidad de este tema en la ingeniería de carreteras (Correia y Wirasinghe, 2004).

En 1986, la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés) requirió a la Junta de Investigación en Traspotación (TRB, por sus siglas en inglés) estudiar formas de medir la capacidad de aeropuertos; esto debido a la necesidad de identificar aspectos que puedan limitar la capacidad de estos sistemas (TRB, 1987). En la realización de estos estudios se reconoció que la capacidad de un aeropuerto no puede ser evaluada sin antes definir niveles de servicio aceptables. Lemer (1988) catalogó este estudio como un importante primer paso en el esfuerzo por definir guías para la evaluación de aeropuertos. Sin embargo, el autor indicó que aún queda mucho trabajo por realizarse para lograr definir guías aceptables que permitan asignar un nivel de servicio a la infraestructura utilizada por estos sistemas de transportación.

1.2 Problema de Investigación

La FAA y la Organización Internacional de Aeronáutica Civil (ICAO, por sus siglas en inglés) son las organizaciones encargadas de regular el diseño y rendimiento de aeropuertos en Estados Unidos y sus territorios. La Oficina de Estadísticas de Transportación (BTS, por sus siglas en inglés) del Departamento de Transportación de Estados Unidos (USDOT, por sus siglas en inglés), trabaja junto a la FAA y la ICAO en la recolección de datos de diversos sistemas de transportación en Estados Unidos y sus territorios. Estas organizaciones hacen públicos los datos compilados mediante bases de datos electrónicas; las personas pueden tener acceso a estos datos sin costo alguno. Sin embargo, no existe una metodología de evaluación estándar para este sistema de transporte.

A pesar de los efectos de la reciente recesión económica, en el 2011 se registraron cerca de 33 millones de embarques comerciales más que en el 2000 en aeropuertos de Estados Unidos y sus territorios, lo que indica la importancia de aumentar la capacidad del sistema para responder a las necesidades de la economía de la nación. La FAA estima que el costo nacional de la congestión y los retrasos en los aeropuertos fue alrededor de \$22 mil millones en el 2012. Si los niveles actuales de financiamiento federal se mantienen, la FAA anticipa que el costo en la economía de la congestión y los retrasos aéreos aumentará de \$34 mil millones en el 2020 a \$63 mil millones para el 2040 (ASCE, 2013).

Evaluaciones de infraestructura realizadas por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) califican la infraestructura de aviación de Estados

Unidos como una deficiente en una escala estándar de educación. Sin embargo, para estas evaluaciones no se especifican datos o metodología utilizados para llegar a dicha calificación. Es necesario identificar los factores y elementos útiles para evaluar la infraestructura operacional de un aeropuerto y poder así desarrollar un modelo de evaluación adecuado. El mismo podría utilizarse para evaluar periódicamente los aeropuertos y de esta forma lograr una asignación de recursos más eficiente.

En la mayoría de los casos, los aeropuertos que experimentan tardanzas extremas solucionan este problema aumentando la capacidad del aeropuerto mediante la construcción de una nueva pista (Vásquez et al., 2011). Esta solución resulta en un gasto excesivo de presupuesto y recursos. En adición, se ha indicado que las inversiones futuras en aviación deberían considerar cambios dinámicos en diversas áreas, tales como los sistemas de navegación, seguridad, capacidad, el ciclo de vida del mantenimiento de las instalaciones y tecnologías innovadoras a usarse en los aeropuertos (ASCE, 2013).

La mayoría de las evaluaciones realizadas a aeropuertos se llevan a cabo utilizando listas de cotejo. Estas listas de cotejo son creadas en base a las guías de diseño y medidas de rendimiento publicadas por la FAA. Varias de las guías de diseño desarrolladas por la FAA y utilizadas actualmente fueron publicadas en la década de los 80 (FAA 1980, 1983 y 1988 entre otros). La mayoría de la información recopilada en estos documentos fue extraída de guías más antiguas desarrolladas en 1975 por la misma agencia. Desde entonces sólo se han realizado cambios menores a estas guías. Sin embargo, cambios significativos en tecnología, estructura de la industria y operaciones de las aerolíneas han influenciado en la infraestructura y procesamiento en los aeropuertos desde los últimos cambios realizados a las guías de diseño de la FAA. Por ejemplo, los cambios en el sistema de registro en los terminales, la seguridad de pasajeros y equipaje, la incursión de aerolíneas de bajo costo con menos requerimientos de espacio, los cambios en estándares de nivel de servicio, en criterios de diseño y en la seguridad y demanda en concesiones necesitan ser añadidos en revisiones futuras de las regulaciones de la FAA (ACRP, 2010).

Para evaluar la infraestructura y operación de un aeropuerto es necesario estudiar los factores que afectan la operación del mismo (Vásquez et al., 2011). Según mencionado anteriormente, no existe un proceso estándar para efectuar dicha evaluación, por lo que es necesario desarrollar una metodología piloto que permita identificar puntos estratégicos de

mejora en la operación de un aeropuerto y por consiguiente su capacidad. Los resultados y recomendaciones del método de evaluación desarrollado pueden ayudar a mejorar el funcionamiento, además de añadir capacidad al aeropuerto evaluado sin la necesidad de incurrir en una inversión de gran magnitud como lo es la construcción de una nueva pista.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar una metodología piloto para la evaluación de la infraestructura operacional de aeropuertos, tomando en cuenta los factores y elementos que afectan el rendimiento y nivel de servicio de estos. Los objetivos específicos son:

- identificar mediante el repaso de literatura e inspección de campo, los aspectos que afectan el nivel de rendimiento y servicio de la infraestructura operacional de aeropuertos,
- desarrollar un modelo de evaluación de infraestructura y operación de aeropuertos que incorpore los aspectos identificados y muestre deficiencias en la operación de un aeropuerto,
- evaluar la infraestructura y operación del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín mediante el uso del modelo desarrollado, y
- sugerir alternativas para aliviar o mitigar las deficiencias halladas en el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín en base a los resultados de la evaluación realizada.

1.4 Alcance

Esta investigación se centra en el desarrollo de un modelo, el cual permite evaluar la infraestructura y operación de un aeropuerto. Los aeropuertos son estructuras complejas donde se llevan a cabo operaciones de aviación civil y militar. Para el trabajo realizado sólo se tomó en consideración las funciones necesarias para realizar operaciones comerciales en aeropuertos regulados por la FAA, la cual es parte de la aviación civil. Los aeropuertos regionales no fueron considerados en esta investigación debido a que la metodología desarrollada sólo aplica para aeropuertos primarios según son identificados por la FAA. Los aeropuertos comerciales primarios manejan el 0.05% o más de la demanda del sistema. El modelo incorpora aspectos de los diferentes modos de aviación sólo cuando son necesarios para lograr evaluar la operación comercial. La Figura 1.1 muestra el flujo de pasajeros y equipaje en un vuelo doméstico para los procesos de salidas y llegadas según la ACRP (2010). El camino azul en la Figura 1.1 muestra

las áreas y procesos por las que puede circular un pasajero en el proceso de salida desde su origen mientras que el camino naranja muestra estas mismas características para el proceso de llegada de un pasajero a su destino. El camino verde representa el procesamiento de equipaje en el transcurso de salida de origen y llegada para un vuelo doméstico.

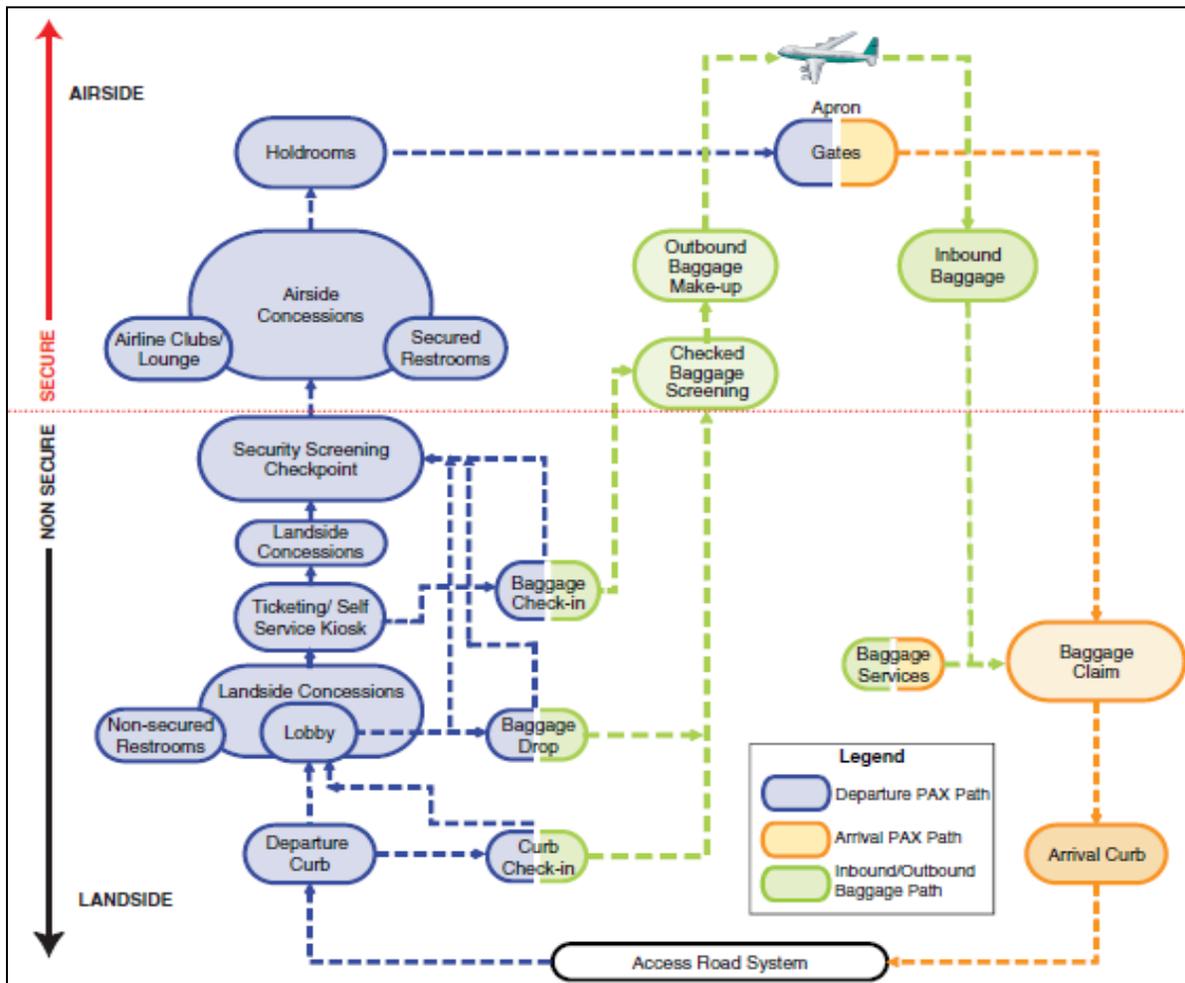


Figura 1.1 Diagrama de procesos en un aeropuerto para un vuelo doméstico (ACRP, 2010)

Dentro de los procesos mostrados en la Figura 1.1, para esta investigación sólo se tomaron en consideración los procesos llevados a cabo por el flujo de pasajeros en los procesos de salida de origen y llegada a destino final para vuelos domésticos y vuelos internacionales. Los vuelos internacionales requieren procesos adicionales a los mostrados en la Figura 1.1. Los resultados no aplican necesariamente al manejo de equipaje ya que no se toman en consideración en el desarrollo del modelo. Factores relacionados a la infraestructura, movilidad y capacidad son evaluados mediante el modelo desarrollado. Los resultados obtenidos en base al modelo no

representan una evaluación más allá de la capacidad y eficiencia operacional de la infraestructura aeroportuaria evaluada. Los aspectos de seguridad y comodidad evaluados mediante la metodología desarrollada sólo forman parte de la evaluación por su impacto en la infraestructura operacional del aeropuerto y no se pretende evaluar estos aspectos directamente.

1.5 Beneficios Esperados

La construcción y operación de infraestructura tiene un impacto directo en el bienestar económico y social de un país. Es por esto que cada infraestructura debe ser evaluada periódicamente para determinar su condición actual en comparación con un periodo previo, además de analizar la demanda y nivel de servicio esperado. A diferencia de otros sistemas de transporte, los aeropuertos carecen de una metodología estándar de evaluación para su infraestructura y operación. La desinformación en aeropuertos en relación a los factores causantes de alta congestión y demoras puede llevar a una ineficiente asignación de recursos. El desarrollo de una metodología para la evaluación de la infraestructura aeroportuaria ayudaría a:

- identificar deficiencias en la operación,
- obtener alternativas para reducir demoras y/o congestión en periodos pico de operación,
- aumentar o mantener un nivel de rendimiento y/o servicio,
- proveer eficiencia en la asignación de recursos, e
- incrementar la confiabilidad de los usuarios en el sistema.

1.6 Organización de la Tesis

Siguiendo un orden lógico para la redacción de esta tesis, se organiza la información en siete capítulos. En este primer capítulo se ofrece un trasfondo de la investigación, enfocado en la infraestructura de aeropuertos y los beneficios de una evaluación periódica. Se define el problema de investigación, los objetivos, el alcance y los beneficios esperados de esta tesis.

En el segundo capítulo se identifican y describen los pasos seguidos para cumplir con los objetivos de este estudio en la metodología de investigación. Además, se incluye un desglose de los datos utilizados para el estudio de caso del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín.

En el tercer capítulo se ubica la revisión de literatura. Además, se describen las evaluaciones realizadas a la infraestructura de Estados Unidos e información general del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín de Puerto Rico.

En el cuarto capítulo se explica el modelo desarrollado para la evaluación de la infraestructura operacional de aeropuertos.

En el quinto capítulo se explica en detalle la metodología desarrollada para evaluar aeropuertos comerciales que operen bajo las regulaciones de la FAA. Se especifican y crean procedimientos y escalas de evaluación para lograr objetividad en el proceso. Los aeropuertos son divididos en las zonas terrestre, terminal y aérea descritas para lograr obtener tres evaluaciones independientes. Estas evaluaciones pueden ser agregadas para obtener la evaluación general de la infraestructura operacional del aeropuerto.

En el sexto capítulo se presentan los resultados de la evaluación al Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín como estudio de caso para probar y validar la metodología desarrollada. Se evaluó el Terminal A de dicho aeropuerto como ejemplo para la evaluación de los componentes de un edificio terminal.

En el séptimo y último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones en relación al modelo y metodología desarrollada. Además se desarrollan conclusiones basadas en los resultados obtenidos de la evaluación realizada al Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y DATOS PRELIMINARES

En este capítulo se identifican y describen los pasos seguidos para cumplir con los objetivos de este estudio. Además, se incluye un desglose de los datos utilizados para el estudio de caso del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (SJU), tomados de un estudio previo realizado a la infraestructura de dicho aeropuerto.

2.1 Flujograma de Metodología

Las tareas llevadas a cabo en la realización de esta tesis incluyeron el desarrollo de un modelo y la metodología para la evaluación de aeropuertos, el estudio de caso del aeropuerto SJU, la recolección de datos a utilizarse en el modelo y el análisis de los datos por distintos métodos y criterios. La Figura 2.1 muestra el flujo grama de la metodología seguida para cumplir con los objetivos de la investigación. En ésta se incluyen el plan de trabajo y las actividades realizadas en el transcurso de la investigación.

La revisión de literatura permitió la identificación de aspectos necesarios para la evaluación de infraestructura y operación de aeropuertos. Estudios previos de diseño y evaluación de aeropuertos promueven la división de los aeropuertos en tres zonas: zona terrestre, zona terminal y zona aérea.

Entre los métodos utilizados para analizar los datos obtenidos se desarrolló una simulación a base de eventos discretos, análisis estadísticos y probabilísticos y la utilización de escalas de nivel de servicio, entre otros. Los pasos a seguir para este estudio están representados en el flujo grama mostrado en la Figura 2.1. Los primeros pasos fueron: el planteamiento del problema a investigarse y la realización de una revisión de literatura en relación a factores que afectan la operación de un aeropuerto y metodologías de evaluación y nivel de servicio en aeropuertos. Una vez se identificaron los factores, se desarrolló un modelo de evaluación y se utilizaron datos del aeropuerto SJU para realizar un estudio de caso del mismo y de esta forma validar el modelo desarrollado.

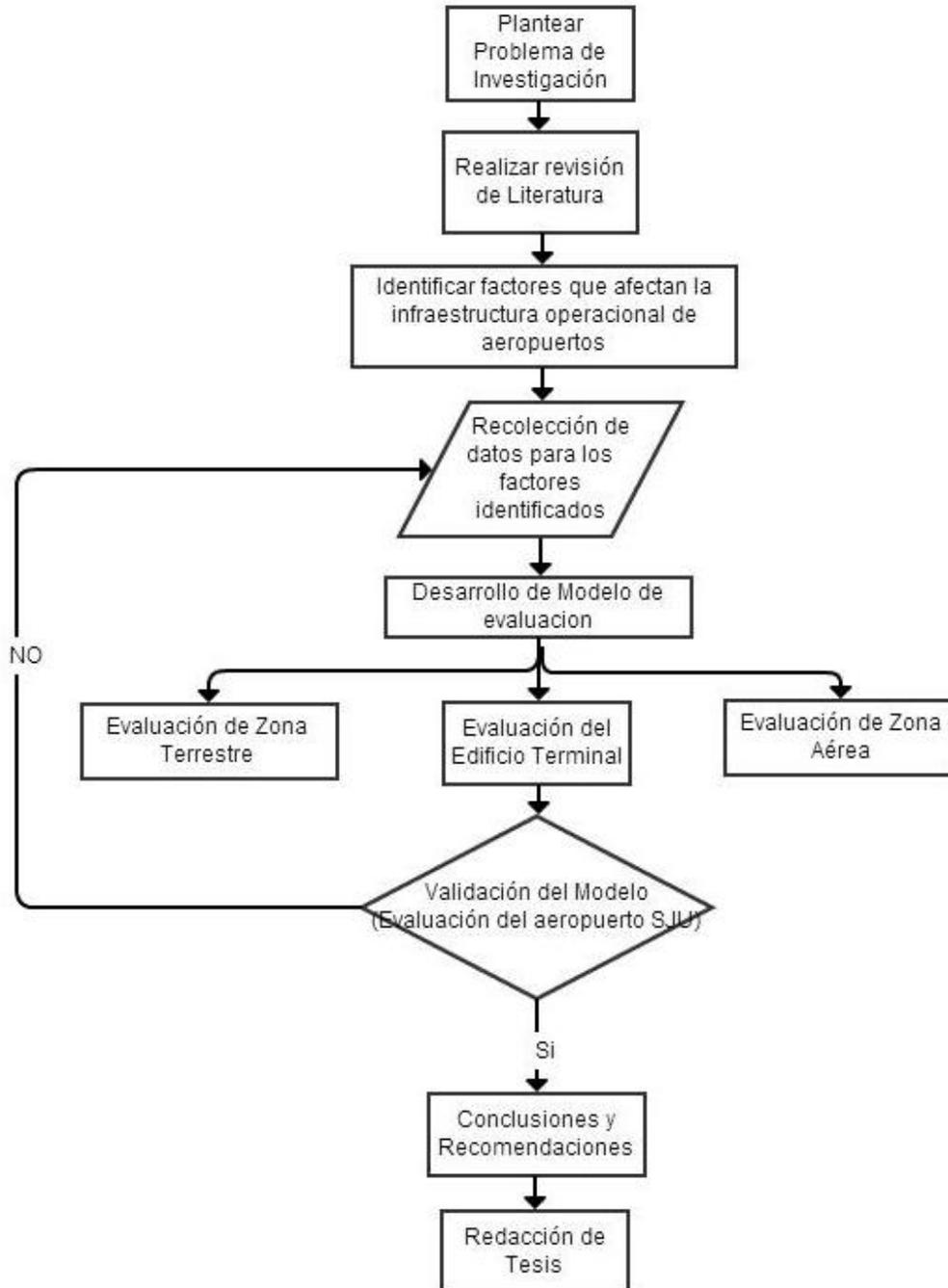


Figura 2.1 Flujograma de la metodología de investigación

2.2 Datos para la Evaluación de Infraestructura del Aeropuerto SJU

Una reciente investigación permitió la recopilación de datos operacionales y de infraestructura del aeropuerto SJU. La investigación, propuesta por la Dra. Ivette Cruzado y presupuestada por La Autoridad para las Alianzas Público Privadas (AAPP), buscó determinar un nivel de servicio o rendimiento para la infraestructura del aeropuerto SJU. La Autoridad de

los Puertos de Puerto Rico (APPR) sirvió de apoyo esencial en la recopilación de datos para este trabajo. Esta investigación abrió paso a la realización de esta tesis.

Los datos recopilados de dicha investigación se pueden dividir de acuerdo a tres diferentes zonas de un aeropuerto: zona terrestre, zona de edificio terminal y zona aérea. Esta división va acorde con las áreas de evaluación incluidas en el modelo desarrollado para esta tesis. Dimensiones tales como área disponible para estacionamientos, espacio disponible para flujos de pasajeros dentro y fuera del terminal y geometría de pista y calles de rodaje, fueron utilizados para evaluar el aeropuerto SJU. Datos de tiempo de espera, tiempo de procesamiento y dimensiones de proceso se utilizaron para asignar una calificación a las instalaciones del edificio terminal. La accesibilidad y comodidad del edificio terminal se tomaron en consideración mediante la recolección de datos dimensionales de instalaciones peatonales de acceso al terminal y número de asientos disponibles para cada salida de avión, entre otros. En las próximas secciones se muestran los datos disponibles del aeropuerto SJU para las distintas zonas del aeropuerto.

2.2.1 Zona Terrestre

La zona terrestre está compuesta por todos los elementos y procesos necesarios para que los pasajeros o visitantes tengan acceso al edificio terminal del aeropuerto. Entre los datos y recursos obtenidos del aeropuerto SJU para esta área se encuentra el número y distribución de estacionamientos. Las dimensiones de cada una de estas instalaciones, incluyendo el encintado frente al Terminal A, se obtienen mediante mapas digitales del aeropuerto y medidas tomadas en campo.

El aeropuerto SJU cuenta con un estacionamiento multinivel de seis niveles que contiene aproximadamente 4,000 espacios. A esto se le suma un espacio adicional adyacente al multinivel de aproximadamente 900 espacios. Los primeros dos niveles del estacionamiento multinivel son utilizados exclusivamente para la renta de vehículos, los niveles tres y cuatro son de uso general y los restantes dos niveles están reservados para empleados. El aeropuerto SJU provee 18 espacios de estacionamiento temporero gratuito (con un máximo de 45 minutos) en un área cercana a los terminales para personas que deseen esperar en esta área la llegada de los pasajeros. El espacio de 900 estacionamientos es utilizado por personal administrativo y federal (PRPA, 1995)

2.2.2 Zona Terminal

El edificio terminal es el punto de transferencia de pasajeros y equipaje desde la zona terrestre a la zona aérea. En estas instalaciones es donde ocurre la mayor cantidad de procesos y por lo tanto donde mayor tiempo de demora muestran los pasajeros en un aeropuerto. Como parte del estudio previamente mencionado se tomaron datos de dimensiones, tiempo entre llegadas y tiempo de servicio de los diferentes procesos llevados a cabo en el Terminal A del aeropuerto SJU. Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran el tamaño de muestra así como el promedio y desviación estándar del tiempo entre llegadas y tiempo de servicio (sin incluir el tiempo de espera) respectivamente para cada proceso dentro del terminal. Para el caso de los tiempos entre llegadas se realizaron los cálculos para los grupos de pasajeros que llegaban en el mismo instante mientras que el tiempo de servicio se distribuyó por pasajero.

Tabla 2.1 Estadística descriptivas de datos de tiempo entre llegadas para los procesos en el Terminal A del aeropuerto SJU

Proceso	Tiempo entre Llegadas		
	Muestra (grupos)	Promedio (min.)	Desviación Estándar (min.)
Registro con empleado	66	0.81	0.87
Registro en kioscos	105	0.90	1.05
Entrega de equipaje	105	0.67	0.69
Inspección de seguridad	105	0.66	0.56

Tabla 2.2 Estadística descriptivas de datos de tiempo de servicio obtenidos para los procesos en el Terminal A del aeropuerto SJU

Proceso	*Tiempo de Servicio			
	Muestra (grupos)	Pasajeros	Promedio (min.)	Desviación Estándar (min.)
Registro con empleado	103	182	2.10	1.23
Registro en kioscos	103	147	2.15	1.02
Entrega de equipaje	104	156	1.70	0.76
Inspección de seguridad (documentos)	104	131	0.37	0.17
Inspección de seguridad (equipaje)	105	124	3.92	1.71

* Tiempo de espera no incluido en el tiempo de servicio

El tiempo entre llegadas se calculó mediante el tiempo de llegada de un pasajero o grupo de pasajeros a los distintos procesos del terminal. El tiempo de llegada se tomó por medio de un cronómetro. Comenzando en tiempo cero, se anotó el tiempo de llegada de pasajeros y número de pasajeros que compone cada grupo en el proceso en cuestión. En la hoja de datos igualmente

se anotaron la fecha, nombre del anotador, hora de comienzo y hora de finalizada la toma de datos. Se calculó el tiempo entre llegadas obteniendo la diferencia en tiempos acumulados.

El tiempo de servicio se midió de igual forma haciendo uso de un cronómetro, comenzando en el momento en que el pasajero es servido hasta que es terminado de servir. A este tiempo no se le incluye el tiempo de espera en fila por los pasajeros. Se incluye asimismo la información de número de pasajeros que componen el grupo servido, fecha, nombre del anotador, hora de comienzo y hora de finalizada la toma de datos.

Datos de espacio y número de elementos también se encuentran accesibles, como lo son el número de asientos disponible por salida en el Terminal A del aeropuerto SJU, el área disponible para espera de salida del vuelo y para el flujo de pasajeros dentro del terminal y la ubicación de dispositivos de información. Las Tabla 2.3 muestra los datos disponibles para esta área de estudio.

Tabla 2.3 Número de asientos y área de espera disponibles en las salidas del Terminal A en el Aeropuertos SJU

Salida	Avión de mayor capacidad	Número de asientos	Área de espera (pies x pies)
1	A320	160	55 x 106*
2	A320	160	
3	A320	124	48 x 53
4	A320	156	48 x 47
5	A320	160	48 x 47
6	A320	156	49 x 49
7	A320	112	30 x 74

* Las salidas 1 y 2 comparten un área de espera

2.2.3 Zona Aérea

La zona aérea está compuesta por los elementos necesarios para la operación y estacionamiento de aviones. Los datos estadísticos publicados por la BTS permiten obtener estadísticas de llegada y salida de vuelos, tiempo en plataforma de aviones, número de operaciones por mes o año, comenzando en 1987 (mes en que comienza el registro de esta información) para aeropuertos de Estados Unidos y sus territorios. La BTS también permite obtener estadísticas de movimiento de pasajeros además de número y porcentaje de vuelos retrasados y causas de estos retrasos. Datos estadísticos de las BTS (2013), además de datos provistos por la Autoridad de los Puertos de Puerto Rico con respecto al aeropuerto SJU son utilizados para la realización de esta tesis.

Entre los datos obtenidos mediante el estudio realizado previamente en el aeropuerto SJU se encuentran datos de tiempos de ocupación de pista en las operaciones de aterrizaje y despegue, tiempos de ocupación de calles de rodaje y tiempos de ocupación de plataforma para el Terminal A. Estos se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.4 Estadística descriptivas de datos de tiempo de ocupación obtenidos para operaciones en el aeropuerto SJU

Tiempo de Ocupación	Estadística descriptiva (minutos)		
	Muestra	Promedio	Desviación Estándar
Pistas	0.83	0.97	0.27
Plataforma de Terminal A	20	55.6	11.7
Calles de Rodaje - Aterrizaje	20	2.9	1.1
Calles de Rodaje – Despegue	11	8.9	-

Los datos de ocupación de las pistas se tomaron en la operación de despegue, justo desde que el avión entra a la pista hasta que sobrevuela el umbral de la pista. Para el aterrizaje se tomaron los datos de tiempo de ocupación desde que el avión sobrevuela el umbral de la pista hasta que despeja la zona de seguridad de la misma. El tiempo en plataforma se tomó desde el momento en que el avión se estaciona en la puerta correspondiente hasta que comienza el movimiento de retroceso (*pushback*) para el proceso de despegue. El tiempo de ocupación de calles de rodaje se consideró desde que la aeronave toma la salida y despeja la pista hasta que culmina el proceso de estacionamiento del aeroplano.

CAPÍTULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA

La revisión de literatura realizada para el tema de esta tesis incluye investigaciones sobre la obtención del nivel de servicio en aeropuertos y factores estudiados para ser considerados en el modelo de evaluación. Además, se describen las evaluaciones realizadas a la infraestructura de Estados Unidos e información general del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín de Puerto Rico.

3.1 Nivel de Servicio en Aeropuertos

Estudios realizados desde el año 1970 muestran un esfuerzo por determinar un nivel de servicio (LOS, por sus siglas en inglés) para aeropuertos. Sin embargo, dichos estudios fueron meramente descriptivos y no presentaban un estándar definido. En las últimas dos décadas se han desarrollado métodos de evaluación de LOS en función de las características del terminal de los aeropuertos (Correia y Wirasinghe, 2006). No obstante, ninguno de estos métodos ha sido aceptado como un estándar en la evaluación para estos sistemas. Diferentes definiciones, modelos y metodologías forman parte de los esfuerzos realizados para asignar niveles de servicio a los diferentes componentes de un aeropuerto.

3.1.1 Definiciones de Nivel de Servicio

Transport Canada (1979) definió el nivel de servicio en aeropuertos como “una medida o evaluación de las condiciones y características operacionales de cualquier subsistema o instalación terminal en un nivel de demanda o volumen de usuarios en particular.” Debido a que la demanda de tráfico aéreo en cada aeropuerto es dinámica y varía de acuerdo a factores como el horario, sector de vuelo, y la carga de los aviones, la medida de nivel de servicio debe reflejar estos aspectos dinámicos. Por lo tanto, el nivel de servicio puede ser considerado como un rango de valores de evaluación de la capacidad de la oferta para satisfacer la demanda.

Mediante la adopción de la escala de seis letras desarrollada por el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM, por sus siglas en inglés), *Transport Canada* representa los niveles de servicio con seis letras (A a la F) y los define como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Nivel de servicio definido por *Transport Canada* (1979)

Nivel de Servicio	Descripción
A	<u>Nivel de Servicio Excelente</u> : Condición de flujo libre; Sin demoras; Rutas directas; Excelente nivel de comodidad.
B	<u>Nivel de Servicio Alto</u> : Condición de flujo estable; alto nivel de comodidad.
C	<u>Nivel de Servicio Bueno</u> : Condición de flujo estable; rendimiento aceptable; subsistemas relacionados en balance.
D	<u>Nivel de Servicio Adecuado</u> : Condición de flujo inestable; demoras; condiciones aceptables por periodos cortos de tiempo.
E	<u>Nivel de Servicio Inestable</u> : Condición de flujo inestable; subsistemas en desbalance; representa capacidad limitada del sistema.
F	<u>Falla del Sistema</u> : Niveles de congestión y demoras inaceptables

La Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA, por sus siglas en inglés) es la asociación de líneas aéreas más abarcadora a nivel mundial. La IATA es la encargada de establecer los códigos de tres letras utilizados comúnmente para identificar los aeropuertos. Esta asociación adoptó, en principio, la definición de nivel de servicio desarrollada por *Transport Canada*. En 1990, IATA junto al Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI, por sus siglas en inglés), modificaron las definiciones de nivel de servicio desarrolladas por *Transport Canada* (ACRP, 2010). Esta definición de LOS es la más utilizada actualmente y se describe a continuación:

- A** – Excelente; Condición de flujo libre; no hay demoras; excelente nivel de comodidad.
- B** – Alto; Condición de flujo estable; pocas demoras; alto nivel de comodidad.
- C** – Bueno; condición de flujo estable; demoras aceptables; buen nivel de comodidad.
- D** – Adecuado; Condición de flujo inestable; demoras aceptables por periodos cortos de tiempo; nivel de comodidad adecuado.
- E** – Inadecuado; condición de flujo inestable; demoras inaceptables; nivel de comodidad inadecuado.
- F** – Inaceptable; condición de flujos cruzados; falla del sistema y demoras inaceptables; nivel de comodidad inaceptable.

Proyectos de investigación proveyeron la siguiente definición para nivel de servicio en aeropuertos: “Nivel de servicio es una medida de cómo un componente, subsistema, y el sistema se desempeñan. El límite máximo tolerable especificado por las medidas de nivel de servicio son el criterio del nivel de servicio” (ACRP, 2010). Esto significa que la evaluación del servicio se lleva a cabo mediante la comprobación de si se ha excedido o no el límite máximo tolerable. Así que, en esencia, el nivel de servicio de aeropuertos contiene solo dos niveles.

3.1.2 Modelos y Metodologías

A diferencia de otros modos de transporte, la calidad del servicio brindado a los pasajeros en aeropuertos es manejada en su mayoría por las aerolíneas y agencias federales, no por la administración del aeropuerto. Establecer medidas para evaluar el rendimiento operacional y la calidad del servicio de un aeropuerto es uno de los mayores problemas enfrentados por las aerolíneas y los operadores (Mumayiz, 1991). Es por esto que investigadores del campo de la aviación han publicado documentos describiendo distintos métodos y modelos para evaluar partes de un aeropuerto, aunque no para realizar una evaluación general de los mismos.

Correia y Wirasinghe (2006) desarrollaron una metodología para la evaluación de los procesos en el terminal de un aeropuerto. Este modelo fue aplicado a la evaluación del proceso de registro convencional con empleado (*check-in*) en el terminal del aeropuerto internacional de São Paulo en Brasil. Se crearon escalas de nivel de servicio en base a la entrevista de una muestra de 120 pasajeros en el proceso de registro. Los autores utilizaron una regresión lineal (Figura 3.1) para estimar los límites de LOS (Tabla 3.2) correspondientes a este proceso.

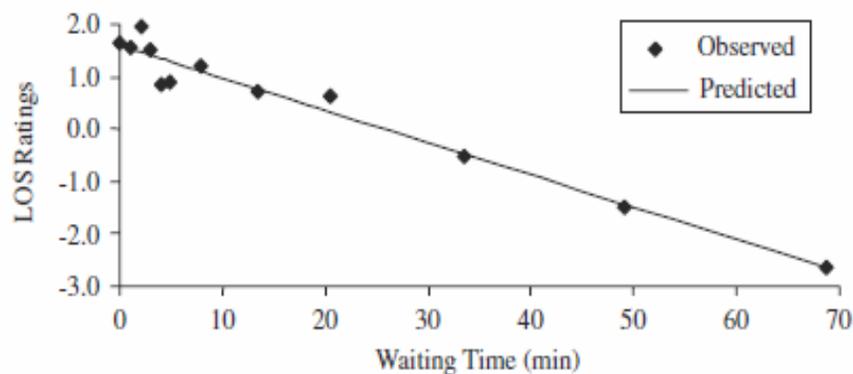


Figura 3.1 Regresión lineal de tiempos de espera en proceso de registro con empleado (Correia y Wirasinghe, 2006)

Tabla 3.2 Escala de nivel de servicio para el tiempo de espera en el proceso de registro con empleado (Correia y Wirachinghe, 2006)

Nivel de Servicio	Tiempo de Espera (minutos)
A	< 1
B	1 – 17
C	17 – 34
D	34 – 58
E	> 58

La misma metodología fue utilizada para evaluar las características de tiempo de espera, tiempo de procesamiento y espacio disponible en el proceso de registro con empleado. Finalmente, se llevó a cabo un análisis multi-atributos para combinar las tres características analizadas y obtener un nivel de servicio global para el proceso. Los autores verificaron que no existiera colinealidad significativa entre las características evaluadas antes de proceder con el análisis multi-atributos. La regresión de mínimos cuadrados permitió obtener el nivel de servicio combinado. El modelo desarrollado se muestra en la ecuación 3.1.

$$LOS(\textit{check in}) = 0.2 LOS(WT) + 0.3 LOS(PT) + 0.5 LOS(AS) \quad (3.1)$$

dónde:

$LOS(WT)$ = Nivel de servicio de tiempo de espera;

$LOS(PT)$ = Nivel de servicio de tiempo de procesamiento; y

$LOS(AS)$ = Nivel de servicio de espacio disponible.

Las herramientas disponibles para simular los procesos en un aeropuerto han avanzado considerablemente en los últimos 15 años (Brunetta y Romanin, 1999). La simulación se ha vuelto un instrumento más confiable y accesible para el usuario. Debido a los avances tecnológicos, la simulación de procesos se ha convertido en una herramienta útil para la toma de decisiones importantes en un aeropuerto. Los modelos de simulación son utilizados para crear escenarios de proyección, probar nuevas estrategias o equipo y prever situaciones críticas para el aeropuerto como por ejemplo situaciones de seguridad o de sobrecapacidad.

Brunetta y Romanin (1999) desarrollaron un modelo de simulación que permite evaluar el terminal de un aeropuerto. En este estudio se utilizó la escala estándar de LOS (A a F). Los parámetros de evaluación fueron el flujo, las demoras y el nivel de comodidad de los pasajeros. Los autores desarrollaron un modelo de simulación de evento discreto (AIRLAB), el cual supone las acciones y decisiones que toman los pasajeros llegando, partiendo y transfiriéndose dentro del

terminal, al igual que su equipaje. El modelo desarrollado no simula el terminal de un aeropuerto en particular, sin embargo puede ser ajustado para el terminal de interés del usuario. El modelo incorpora un sistema de toma de decisiones basado en las condiciones actuales en las que esté trabajando el terminal y la actualización en línea del calendario de vuelos del aeropuerto.

El terminal más reciente del aeropuerto Milán-Malpensa fue utilizado para validar el modelo desarrollado por Brunetta y Romanin (1999). Dos escenarios fueron simulados basados en dos diferentes días pico de tráfico aéreo. Los autores identificaron que la configuración de los mostradores de registro mostraba dificultades en distintos periodos de tiempo y que la configuración del proceso de inspección de inmigración mostraba un nivel de servicio de C en varios periodos del día. Sin embargo, cuando todos los elementos del escenario se encontraban trabajando correctamente, el nivel de servicio prestado a los pasajeros fue razonable. El estudio llevado a cabo por Brunetta y Romanin (1999) demuestra la aplicabilidad de los modelos de simulación y sus beneficios al utilizarse correctamente.

3.2 Factores Identificados para la Evaluación de Infraestructura de Aeropuertos

Los aeropuertos pueden dividirse en tres zonas para evaluar los mismos: zona terrestre, zona terminal y zona aérea. La mayoría de las investigaciones orientadas a la evaluación de infraestructura de aeropuertos se han realizado sólo para áreas específicas de éstos y no para la totalidad de sus componentes. Estos estudios se han enfocado mayormente en la definición de un nivel de servicio para el edificio terminal y los procesos en el mismo o en la evaluación de capacidad de la zona aérea de los aeropuertos. En la revisión de literatura llevada a cabo para este estudio no se encontró ningún trabajo enfocado en la evaluación de un aeropuerto con todos sus componentes operacionales y menos aún se identificó una metodología desarrollada para la evaluación de aeropuertos.

3.2.1 Zona Terrestre

Los componentes básicos de la zona terrestre, en un aeropuerto comercial son los accesos al aeropuerto, las calles de circulación interna, el estacionamiento y el encintado frente al terminal. Brinke y Madison (1975) resumieron los factores que pueden evaluarse para determinar el nivel de servicio los cuales se presentan en la Tabla 3.3. La ACRP por su parte ha desarrollado guías enfocadas en el diseño, señalización y operación de la zona terrestre de aeropuertos. Sin embargo, ninguno de estos autores ha generado una metodología para la evaluación de esta zona.

Tabla 3.3 Factores de nivel de servicio para la zona terrestre (Brinke y Madison, 1975)

Zona Terrestre	Fácil de cuantificar	Difícil de cuantificar
Accesos (carreteras, transporte colectivo)	Tiempo de viaje Demoras Frecuencia Costo	Nivel de congestión Señalización apropiada
Encintado de terminal	Espacio Disponible Demoras	Nivel de congestión Registro en encintado
Estacionamiento	Disponibilidad de espacio Distancia hasta registro	Servicio de transporte colectivo

3.2.2 Zona Terminal

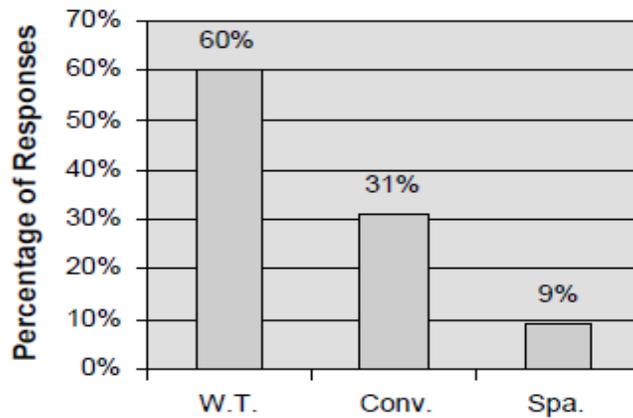
Los edificios terminales son parte esencial de la operación de un aeropuerto y por lo tanto deben ser evaluados detalladamente para conocer puntos estratégicos de mejora que ayuden a optimizar su desempeño. Aunque el terminal de un aeropuerto ha sido el área de enfoque principal en varias investigaciones, no existe un estándar definido que identifique los factores específicos necesarios para lograr obtener un nivel de servicio en terminales de aeropuertos. Brink y Madison (1975) sugirieron que para los pasajeros en un terminal, el nivel de servicio es una impresión subjetiva de la calidad de la transferencia entre el modo de acceso al aeropuerto y el avión. Los autores identificaron una serie de factores que influyen en la percepción subjetiva de los pasajeros. En la Tabla 3.4 se muestran los factores identificados por los autores como sencillos de medir y los factores que muestran mayor dificultad para contabilizar, ya sea por restricciones físicas o la subjetividad de los mismos. Los autores especifican que la calificación de los procesos dentro del terminal debe ser asignada tomando en cuenta el tiempo total de todos los procesos necesarios para terminar la transferencia desde la zona terrestre a la zona aérea o viceversa.

Tabla 3.4 Factores de nivel de servicio para la zona terminal (Brinke y Madison, 1975)

Zona Terminal	Fácil de cuantificar	Difícil de cuantificar
Registro (<i>Check-in</i>)	Tiempo de Procesamiento	Complejidad del proceso Cortesía de los oficiales Ambiente en general
Seguridad	Tiempo de Procesamiento	Proceso actual (revisión, rayos x) Ubicación en relación a los concesionarios Nivel de congestión
Inmigración	Tiempo de Procesamiento	Complejidad del proceso Cortesía de los oficiales Ambiente en general
Salas de espera	Disponibilidad de asientos	Ambiente en general Ubicación en relación a los concesionarios Nivel de congestión
Reclamo de equipaje	Tiempo de espera	Mecanismo envuelto Nivel de congestión Disponibilidad de maleteros Disponibilidad de concesionarios Disponibilidad de asientos
Elementos de circulación (corredores, aceras movibles)	Distancia de caminata Ancho de corredor Altura del techo Tiempo de viaje Frecuencia de servicio Costo	Ambiente en general Mecanismos utilizados Señalización Sistema de altavoces Nivel de congestión
Servicios (Baños)	Disponibilidad Costo	Servicio provisto Nivel de congestión Limpieza
Concesiones (Tiendas, Restaurantes)	Disponibilidad Costo	Servicio provisto Cortesía del operador Ambiente en general Nivel de congestión
Servicios de Información (rótulos)	Disponibilidad	Servicio provisto Claridad, legibilidad, ubicación

Martel y Seneviratne (1990) analizaron los factores que influyen en la percepción de calidad del servicio (QOS, por sus siglas en inglés) de los pasajeros en el edificio terminal de un aeropuerto. La Figura 3.2 muestra los resultados de la encuesta suministrada a los pasajeros en dicho estudio. Mediante esta encuesta se determinó que los factores más influyentes fueron el

tiempo de espera, la conveniencia y el espacio disponible. De acuerdo con la encuesta, varios factores deben ser considerados además de espacio y tiempo para evaluar el QOS.



W.T.=tiempo de espera, Conv.=conveniencia, Spa.=espacio disponible

Figura 3.2 Percepción de los pasajeros de las variables de procesamiento (Martel y Seneviratne, 1990)

En una segunda publicación los autores indicaron que las variables que guían la percepción de un pasajero en cada terminal son diferentes para cada área (Martel y Seneviratne, 1991). Por ejemplo, se encontró que la variable que más afecta la percepción de nivel de servicio del área de circulación es la información. Lo mismo ocurre con la disponibilidad de asientos en las áreas de espera y el tiempo de espera en las áreas de procesamiento de pasajeros. Las guías de diseño preparadas por la FAA y la ICAO intentan uniformizar el diseño de las instalaciones en aeropuertos. Sin embargo, las características individuales de cada aeropuerto dificultan el desarrollo de una metodología estándar para la evaluación de éstos. El diseño de estas estructuras puede ser afectado por la localización, el número y orientación de pistas, las condiciones climatológicas, la dirección del viento, la topografía de la zona, el tipo de aeropuerto y la demanda aérea esperada (PRPA, 2000).

3.2.3 Zona Aérea

La zona aérea de un aeropuerto es considerada como el componente principal en la generación de demoras. Es por esta razón que la construcción de nuevas pistas se ha vuelto una norma en la implementación de soluciones a problemas relacionados a altas demoras en aeropuertos (Vásquez, Y. et al., 2011).

En un esfuerzo porque se reduzca la distancia longitudinal entre aviones necesaria para la aproximación al aterrizaje, la FAA realizó una recolección de datos en tres aeropuertos

principales en Estados Unidos (Weiss y Barrer, 1984). Se tomaron datos de tiempos de ocupación de pista, separación al aterrizaje y tiempos entre llegadas en los aeropuertos La Guardia (Nueva York) y Logan (Boston). Datos de tiempo de ocupación de pistas, tomados en 1983 en el aeropuerto Newark (New Jersey) también fueron utilizados en este estudio. En esta sección se resumen los resultados obtenidos para el tiempo de ocupación de pista ya que es el factor que nos concierne en esta investigación.

En el estudio de Weiss y Barrer (1984) los datos de tiempo de ocupación de pista se tomaron por un observador para la operación de despegues y otro observador para aterrizajes. El tiempo de ocupación de pista en despegue se obtenía desde el momento en que el avión comenzaba el movimiento de despegue sobre la pista hasta que sobrevolaba el umbral de la misma. El tiempo de ocupación de pista para el aterrizaje se obtuvo tomando el tiempo desde que el avión sobrevolaba el umbral de la pista hasta que desocupaba la pista tomando la salida hacia las calles de rodaje. Observaciones en las condiciones de pista seca y pista mojada mostraron una diferencia promedio de 1.6 segundos, lo cual no resulta una diferencia estadísticamente significativa. El promedio obtenido por los autores para el tiempo de ocupación de pista fue de 46 segundos.

3.2.4 Infraestructura de Aeropuertos

La investigación realizada por Vásquez et al. (2011) identifica los aspectos que deben tomarse en consideración al evaluar la infraestructura de un aeropuerto. Los autores dividieron la evaluación de infraestructura de un aeropuerto en tres áreas principales: pistas, edificio terminal e influencias adicionales. El área de pistas incluía todo lo relacionado a la zona aérea de aeropuertos mientras que el área de edificio terminal consistía de todas las operaciones y procesos desde el acceso al aeropuerto hasta el abordaje del avión o vice versa. El área de influencias adicionales estaba compuesta por el marcado de pavimento y el sistema de iluminación de la zona aérea del aeropuerto. La Figura 3.3 muestra un diagrama de la configuración más comúnmente utilizada en el diseño de aeropuertos (ACRP, 2010). La única diferencia significativa entre ambas divisiones es la inclusión de la zona terrestre en el área del Terminal por Vásquez et al. (2011). Ambas particiones incluyen aspectos similares.

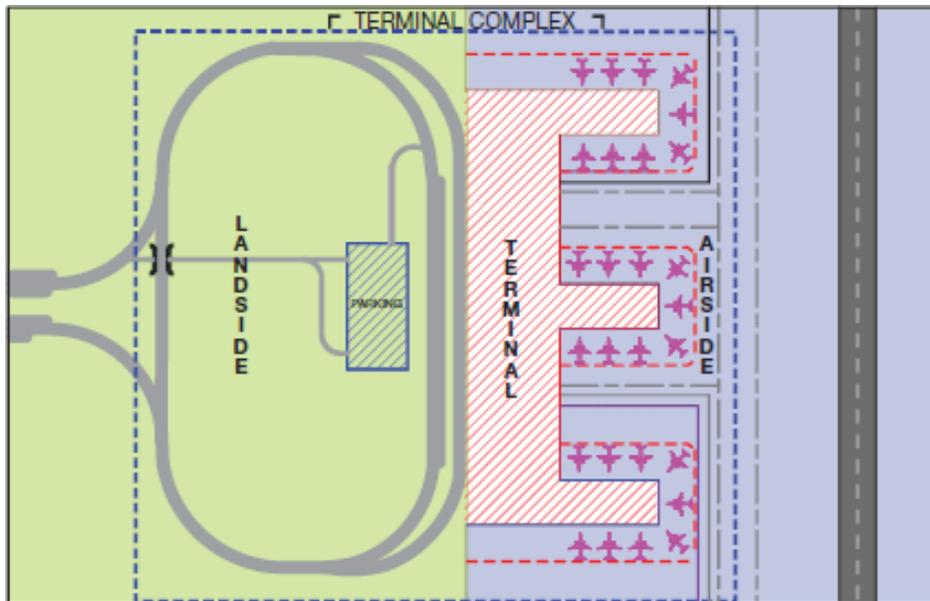


Figura 3.3 Diagrama de la configuración más común para aeropuertos (ACRP, 2010)

Los autores determinaron que el área de Pistas debe considerar la configuración y capacidad de las mismas, el diseño geométrico del campo aéreo, el diseño estructural del pavimento y las instalaciones de drenaje de la zona aérea. La configuración de un aeropuerto se compone del número de pistas y su orientación, una con respecto a la otra, además de la ubicación del edificio terminal en relación a las pistas.

Los componentes principales, identificados por Vásquez et al. (2011) para la zona aérea de un aeropuerto son las pistas, las calles de rodaje y el área de plataforma de los terminales. Según los autores, las calles de rodaje muestran mayor capacidad que las pistas y el área de plataforma, excepto cuando una calle de rodaje interseca una pista activa. Por consiguiente, la capacidad de la zona aérea de un aeropuerto está regida, en la mayoría de los casos, por el componente más restrictivo entre el tiempo de despegue o aterrizaje en la pista y el tiempo en plataforma de los aviones.

El estudio de Vásquez et al. (2011) indicó que la capacidad de una pista está altamente relacionada con la rapidez con la cual un avión puede maniobrar para salir de la pista luego del aterrizaje y el acceso hacia la misma desde el terminal para su despegue. Para obtener la capacidad máxima de las pistas es necesaria una configuración y geometría de salidas y calles de rodaje eficientes. Las calles de rodaje que conectan las pistas con los edificios terminales deben

proporcionar la distancia más corta posible entre estos. Los autores recomiendan valorar los siguientes elementos como parte de la evaluación de pistas:

- configuración, número, espacio y orientación de las pistas,
- configuración, número y ubicación de las calles de rodaje y las salidas de la pista,
- arreglo, tamaño y número de salidas,
- tamaño y variedad de aviones,
- condiciones climatológicas,
- dirección del viento, y
- tiempo de ocupación de pista para la llegada y salida de aviones.

El largo de pista es uno de los estándares de diseño geométrico más importantes para un aeropuerto (ACRP, 2010). El largo de la pista depende de la longitud del avión de mayor envergadura que utilice el aeropuerto con regularidad (más de 3 operaciones por semana).

Vásquez et al. (2011) indican que, entre los elementos de diseño geométrico que forman parte del campo aéreo, se encuentran:

- pavimento estructural,
- paseos de la pista y calles de rodaje,
- zonas de parada de emergencia,
- áreas de seguridad de la pista,
- superficies libres de obstáculos, y
- zona de protección de la pista.

El diseño estructural del pavimento se refiere al tipo y espesor del pavimento necesario para cada una de las distintas áreas de la zona aérea. Entre los parámetros requeridos para el diseño de pavimento se incluyen el peso de despegue de los aviones utilizando el aeródromo, la configuración de sonido para aterrizaje y dimensiones, las áreas de contacto y las presiones de neumáticos y volumen de tráfico (Vásquez et al., 2011). Se debe utilizar el manual *Características de Aviones para la Planificación de Aeropuertos*, provisto por las compañías manufactureras de los aviones, en el cual se identifican la mayoría de las cargas y dimensiones necesarias para el avión más crítico utilizando el aeropuerto (ACRP, 2010).

El drenaje es de suma importancia en toda infraestructura y más aún para un aeropuerto. Los aeropuertos con drenaje inadecuado están más propensos a accidentes. La FAA recomienda

diseñar el sistema de drenaje de un aeropuerto para una tormenta con periodo de recurrencia de 5 años; el diseño debe verificarse para tormentas con frecuencias menores (10 a 15 años) a fin de determinar el daño al tráfico por una tormenta de esta frecuencia (FAA, 2012).

Los autores determinaron que para evaluar el área de edificio terminal, éste se debe dividir en tres componentes. El primer componente es la fase de acceso al terminal, ya sea desde el estacionamiento o área designada para dejar o recoger pasajeros, anexo al terminal. Para el primer componente del área terminal los autores incluyeron las instalaciones de estacionamiento así como las áreas para dejar o recoger pasajeros. En este proceso es recomendable evaluar el número de estacionamientos y acceso al terminal mediante el área recogido de pasajeros. El segundo componente abarca todas las actividades llevadas a cabo para el procesamiento de pasajeros dentro del terminal. En éste se consideraron dos tipos de pasajeros: pasajeros con origen de vuelo en el aeropuerto en cuestión y pasajeros cuyo destino final es el aeropuerto siendo evaluado. El procesamiento de pasajeros incluye el registro de pasajeros, entrega de equipaje, inspección de seguridad, inspección de inmigración y reclamo de equipaje. El tercer componente del área terminal es la fase de acceso al avión, luego del punto de inspección de seguridad. Los espacios para el flujo de pasajeros, áreas de espera, y número de asientos disponibles por cada salida deben ser evaluados en base a los requerimientos y recomendaciones de la FAA.

En el área de influencias adiciones se encuentran la iluminación, el marcado y las señales utilizadas en la zona aérea del aeropuerto las cuales deben cumplir con los requisitos visuales y de orientación de los pilotos (Vásquez et al., 2011). Los autores indican que durante el aterrizaje, rodaje y despegue de un aeroplano, los sistemas de iluminación, marcado y señalización deben proporcionar información visual necesaria para realizar estas maniobras. Por consiguiente la eficiencia de un aeropuerto y su infraestructura operacional puede estar afectada por el mal funcionamiento o posicionamiento de estos dispositivos.

3.3 Evaluación de Infraestructura de Estados Unidos

La ASCE ha evaluado la infraestructura de Estados Unidos por cuatrienios desde su primera evaluación en el 2001. La ASCE utiliza el formato estándar de enseñanza (A, B, C, D ó F) para facilitar la comprensión de las calificaciones obtenidas. Un consejo asesor compuesto por miembros de la ASCE asigna las calificaciones de acuerdo a los siguientes ocho criterios: (1) capacidad; (2) condición; (3) fondos asignados; (4) necesidades futuras; (5) operación y

mantenimiento; (6) seguridad pública; (7) resistencia; e (8) innovación. Desde 1998, las calificaciones han estado cerca de la falla “F”, con un promedio deficiente “D”, debido a un mantenimiento retrasado y la falta de inversión en la mayoría de las categorías (ASCE, 2013).

Los informes de evaluación de la ASCE (publicados en el 2001, 2005, 2009 y 2013) incluyen categorías para la infraestructura de transportación tales como puentes, carreteras, aviación y sistemas de transporte público. En su más reciente evaluación, publicada en el 2013, la ASCE asigna una calificación deficiente “D” a la infraestructura promedio de los Estados Unidos. Esta calificación indica que existen deficiencias en la mayoría de las categorías evaluadas. El informe concluye que es necesaria una inversión de aproximadamente \$3.6 trillones para el año 2020 para lograr un nivel de servicio satisfactorio en la infraestructura de la nación estadounidense. La Figura 3.4 muestra los resultados de las evaluaciones realizadas por la ASCE donde se puede observar que la infraestructura de aviación se ha catalogado como deficiente en las cuatro evaluaciones. Las calificaciones otorgadas a la infraestructura de aviación causan mayor preocupación entre los constituyentes ya que la FAA anticipa un crecimiento de 3% anual en la demanda de transporte aéreo para los próximos años.

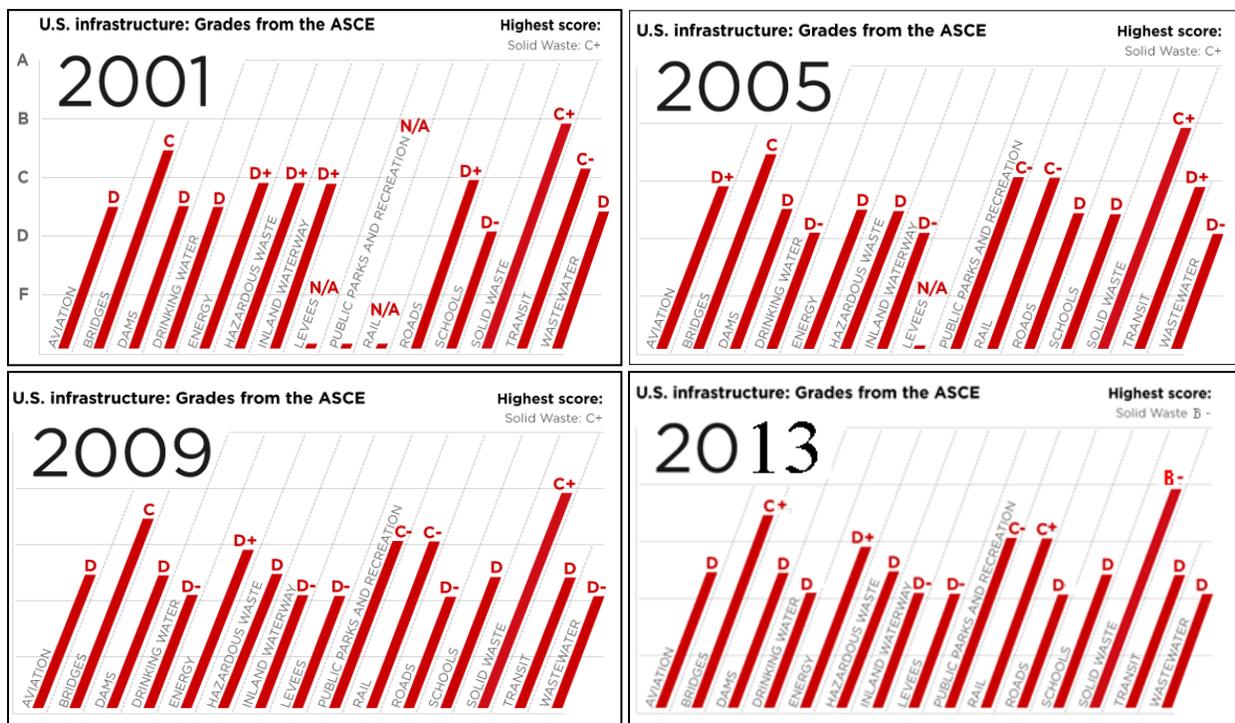


Figura 3.4 Calificación de infraestructura de Estados Unidos (ASCE, 2013)

Para evaluar la categoría de aviación en estos informes, se utilizaron los ocho criterios mencionados anteriormente. La demora, congestión y asignación de fondos son parte de las características tomadas en cuenta en los criterios de evaluación del informe publicado por la ASCE para el año 2013.

La BTS establece que las causas principales para la demora de vuelos domésticos en aeropuertos de Estados Unidos son:

- demora por causa de la aerolínea,
- vuelo que llega retrasado,
- demora relacionada a la seguridad,
- demora a causa del Sistema Nacional de Aviación (NAS, por sus siglas en inglés),
y
- condiciones climatológicas.

Los aeropuertos de Estados Unidos y sus territorios experimentaron un 72.6% de llegadas sin retrasos para el año 2000, lo cual representa el peor registro de llegadas sin retraso para esta región (ASCE, 2009). Para el año 2007, el porcentaje de vuelos sin retrasos resultó ser de 73.4%, convirtiéndose en la segunda peor marca registrada de llegadas sin retrasos en Estados Unidos (BTS, 2013). La Tabla 3.5 muestra la distribución de demoras por causa, desde el año 2004 hasta el 2013 para aeropuertos de Estados Unidos y sus territorios. En esta tabla se puede apreciar cómo ha incrementado notablemente en los últimos años el porcentaje de demora por causa de las aerolíneas y vuelos que llegan retrasados. Las demoras por asuntos de seguridad se consideraron una situación de cuidado luego de los atentados terroristas ocurridos el 11 de septiembre del 2001, aunque las medidas desarrolladas para aliviar el impacto han resultado en la disminución de esta demora.

Tabla 3.5 Distribución de demoras de llegadas por causa en los aeropuertos de Estados Unidos (BTS, 2013)

Causa de Demora	Porciento total de demora en minutos								
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Demora por aerolínea	25.8%	28.0%	27.8%	28.5%	27.8%	28.0%	30.4%	30.1%	31.9%
Vuelo llega retrasado	33.6%	34.2%	37.0%	37.7%	36.6%	36.2%	39.4%	40.8%	41.4%
Demora por seguridad	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%
Demora por NAS	33.5%	31.4%	29.4%	27.9%	30.1%	30.6%	25.7%	24.8%	22.5%
Condiciones climáticas	6.9%	6.2%	5.5%	5.7%	5.4%	5.1%	4.3%	4.2%	4.1%

Según indica la Tabla 3.5, el clima muestra un porcentaje bajo de demora debido a que sólo se incluyen en esta categoría los vuelos cancelados o retrasados por condiciones climáticas extremas. Los vuelos retrasados por condiciones climatológicas manejables son englobados dentro de las causas de demora por NAS. En las causas de demoras por el NAS, el clima y volumen de tráfico aéreo muestran el mayor porcentaje de demora. A esto se le añade, aunque en un porcentaje menos significativo, el mal funcionamiento del equipo y pistas cerradas, entre otros factores. Esta categorización se presenta de esta manera para facilitar a las aerolíneas asignar las causas de demora para sus vuelos.

3.4 Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín de Puerto Rico

El aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (SJU, por siglas de identificación) es el aeropuerto de mayor demanda en Puerto Rico. Es considerado como un aeropuerto de mediana capacidad debido al número de pasajeros embarcados anualmente en este aeropuerto. Se llevan a cabo vuelos comerciales, de aviación general y militares. En esta sección se incluyen datos relevantes del aeropuerto SJU.

3.4.1 Localización y Código de Referencia

El aeropuerto SJU se encuentra ubicado en el municipio de Carolina, en Isla Verde, Puerto Rico. El aeropuerto ocupa 1,615 hectáreas (1,076,390 pies cuadrados) de terreno y está situado a unas 3 millas náuticas al sureste de San Juan, la ciudad capital. Las carreteras PR-26 y PR-17 brindan acceso al edificio terminal del aeropuerto mientras que la carretera PR-190 permite el acceso a áreas de carga y aviación militar por el ala oeste del mismo. La ubicación del aeropuerto se muestra en la Figura 3.5. El punto de referencia del aeropuerto es N 18° 26' 37", W

66° 00' 11", y se encuentra a una elevación promedio de 10 pies sobre el nivel del mar (PRPA, 1995)



Figura 3.5 Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín (Google, 2013)

La FAA define una clasificación de aeropuertos, basado en la longitud de alas del avión de mayor envergadura que visita el aeropuerto regularmente (tres o más visitas a la semana) y su velocidad de aproximación, como el Código de Referencia de Aeropuertos (ARC, por sus siglas en inglés). Según esta código, el aeropuerto SJU está clasificado como un aeropuerto D-V. Las Tablas 3.6 y 3.7 muestran las distintas clasificaciones para las diferentes velocidades de acercamiento y longitud de alas, respectivamente, que presentan las diferentes aeronaves.

Tabla 3.6 Categoría del aeropuerto según la velocidad de aproximación de las Aeronaves (FAA, 2012)

Categoría	Velocidad de Aproximación
A	Menos de 91 nudos
B	91 nudos o más, pero menos de 121 nudos
C	121 nudos o más, pero menos de 141 nudos
D	141 nudos o más, pero menos de 166 nudos
E	166 nudos o más

Tabla 3.7 Clasificación de aeropuertos según la altura de la cola y la longitud de alas del avión típico de mayor envergadura en el aeropuerto (ACRP, 2010)

Grupo para Aeroplano de Diseño de FAA	Altura de cola (pies)	Longitud de Alas (pies)
I. Regional Pequeño	< 20	< 49
II. Regional Mediano	≥ 20 pero < 30	≥ 49 pero < 79
III. Cuerpo Corto/ Regional Grande	≥ 30 pero < 45	≥ 79 pero < 118
IV. Cuerpo extenso	≥ 45 pero < 60	≥ 118 pero < 171
V. Jumbo	≥ 60 pero < 66	≥ 171 pero < 214
VI. Súper Jumbo	≥ 66 pero < 80	≥ 214 pero < 262

3.4.2 Configuración del Aeropuerto

El aeropuerto SJU actualmente está compuesto por dos pistas, las cuales están ubicadas en forma de V abierta una respecto a la otra, con un ángulo de convergencia de 23 grados entre ambas. Las pistas son identificadas con números basados en su orientación respecto al norte magnético. Al norte del aeropuerto se encuentra la pista 8-26 mientras que al sur está ubicada la pista 10-28. La pista 8-26 tiene un largo de 10,002 pies y un ancho de 200 pies mientras que la pista 10-28 cuenta con una longitud de 8,016 pies y un ancho de 150 pies. Las pistas contienen zonas de 200x200 pies en sus extremos, construidas como medida de seguridad y para evitar la erosión del terreno. La pista 8-26 contiene una calle de rodaje paralela parcial mientras que la calle de rodaje paralela a la pista 10-28 cubre la totalidad de la pista. Las pistas se encuentran conectadas por medio de dos puentes al oeste del aeropuerto y una calle de rodaje principal en el área central del aeropuerto.

La mayoría de las instalaciones del aeropuerto SJU se encuentran localizadas entre las pistas. El aeropuerto SJU está dividido en tres sectores: el sector de terminales, el sector central y el sector sur. El sector de terminales se localiza entre las pistas en la parte oeste del aeropuerto; éste está compuesto por el complejo de edificios terminales para pasajeros, las salidas de aviones, los accesos principales para automóviles, el estacionamiento, los establecimientos de alquiler de autos, el hotel del aeropuerto y la Torre de Control de Tráfico Aéreo. El sector central se encuentra localizado al este del aeropuerto, entre las pistas; este sector acomoda las instalaciones de aviación general, carga aérea y militar, además de instalaciones de mantenimiento y funcionamiento del aeropuerto. El sector sur se localiza al sur de la pista 10-28 y contiene instalaciones de carga aérea además de estar bajo la construcción de nuevas instalaciones de aviación general y un nuevo acceso para vehículos.

El aeropuerto SJU cuenta con cinco terminales identificados con las letras A, B, C, D y E. El Terminal A fue recientemente construido y posee un total de siete puertas para aviones. El resto de los terminales cuenta con un total de 39 salidas para aviones. Todos los edificios terminales están conectados para brindar mayor accesibilidad a los pasajeros. El hotel del aeropuerto se encuentra localizado en el Terminal C y cuenta con un total de 60 habitaciones las cuales están distribuidas en cuatro niveles. En el nivel superior del hotel se sitúa una torre de control, actualmente utilizada por la FAA para el control de tráfico aéreo del aeropuerto.

El estacionamiento multinivel localizado al oeste del aeropuerto cuenta con una capacidad aproximada de 4,000 espacios, distribuidos en seis niveles, y un espacio adyacente a éste con 900 estacionamientos adicionales (PRPA, 1995)

3.4.3 Operación y Demoras

Según datos recopilados por la BTS (2013), el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín registró un promedio de 75.3% de llegadas sin retraso en los últimos nueve años (2004-2012). La peor de estas marcas se registró en el 2007 cuando un 69.7% de los vuelos arribaron al aeropuerto sin retraso; esto a pesar de que el número de operaciones (aterrizajes y despegues) en el aeropuerto SJU se encontraba en picada para esta época debido a la recesión económica del país. El número de llegadas en el aeropuerto SJU en el 2004 fue de 26,628 mientras que para el 2011 este número había disminuido a 22,129. Sin embargo, en el 2012 el número de llegadas en el aeropuerto SJU incrementó a 24,784 debido a la apertura de un nuevo edificio terminal (BTS, 2013).

El aeropuerto SJU muestra un número de operaciones menor al manejado por la mayoría de los aeropuertos en Estado Unidos con el mismo código de referencia (D-V). Además, Puerto Rico cuenta con patrones climatológicos poco variantes en comparación con muchos de los estados de la nación estadounidense. Sin embargo, el porcentaje anual de llegadas a tiempo promedio (2004-2012) en el aeropuerto SJU es menor (75.3%) al promedio de los aeropuertos en Estados Unidos y sus territorios (77.9%).

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO DE EVALUACIÓN DE AEROPUERTOS

En este capítulo se explica el modelo desarrollado para la evaluación de la infraestructura operacional de aeropuertos. Se describe la división de los aeropuertos en tres zonas de evaluación (zona terrestre, zona terminal y zona aérea) las cuales fueron incorporadas en un modelo de evaluación en matriz.

4.1 Matriz para Tamizar Ideas

El modelo desarrollado mediante esta investigación es una variación de lo que se denomina como una matriz de evaluación. Las matrices de evaluación son comúnmente utilizadas para evaluar una serie de alternativas contra los criterios identificados para evaluar cada alternativa. El uso de las matrices de evaluación es un método sencillo para evaluar objetivamente cada una de las alternativas establecidas. Entre las variantes de matrices de evaluación se encuentran (Nieves, 2003):

- matrices de rango de actuación,
- matrices para tamizar ideas,
- matrices para valorar alternativas,
- matriz sistémica de valoración, y
- matrices para la evaluación de estrategias.

La matriz de evaluación utilizada en esta tesis es una modificación de una matriz para tamizar ideas. Las matrices para tamizar ideas son una adaptación de Majaro (1988); a cada uno de los criterios seleccionados se le asigna un peso específico los cuales se evalúan según el rango de puntuación de evaluación escogido. La suma de los pesos de cada uno de los criterios debe ser uno o cien por ciento. La multiplicación de la puntuación obtenida por cada criterio por el peso específico asignado resulta en la calificación de cada criterio para la alternativa evaluada. La suma de la calificación obtenida por cada criterio representa la calificación de la alternativa evaluada. La Figura 4.1 muestra un ejemplo de una matriz para tamizar ideas.

ALTERNATIVA K												
ALTERNATIVA 2												
ALTERNATIVA 1												
CRITERIOS DE ATRACTIVIDAD	PESO A	CALIFICACIÓN B										A X B
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	$\Sigma 1.0$											Σ

Figura 4.1 Matriz para tamizar ideas (Nieves, 2003)

4.2 Zonas de Evaluación

El modelo de evaluación desarrollado en esta investigación califica la gran mayoría de los aspectos identificados por Vásquez et al. (2011) para la evaluación de infraestructura de aeropuertos. Se definen tres áreas principales para la evaluación de un aeropuerto, siguiendo la división comúnmente utilizada por agencias y juntas relacionadas a estos sistemas. Esta nomenclatura es utilizada comúnmente por la FAA y TRB para el diseño e investigaciones de este tipo de transporte. Éstas dividen los aeropuertos en tres distintas zonas: aérea, terminal y terrestre.

La eficiencia operacional de la zona aérea determina, en gran medida, la capacidad de procesamiento de pasajeros en la zona terminal (ACRP, 2011). La necesidad de espacio para esta zona por lo regular supera los espacios provistos para las zonas restantes. La zona terminal, por su parte, es la zona de mayor evolución. Un balance entre la capacidad de la zona aérea y la zona terminal conduce a la maximización de la capacidad del aeropuerto, mientras que lo contrario reduce en gran medida la capacidad operacional y por lo tanto se producen demoras excesivas. La zona terrestre permite evaluar los elementos y aspectos necesarios para una transición segura y eficiente entre el modo de llegada al aeropuerto y el edificio terminal.

La zona aérea es la zona que controla la capacidad operacional del aeropuerto; es por esta razón que esta zona contiene el mayor peso porcentual en el modelo desarrollado (45%). Por su parte, la zona terminal juega un papel clave en la operación de estos sistemas de transporte por la cantidad de demoras que se generan en el extenso procesamiento de pasajeros, aunque en la mayoría de los casos tiene una capacidad mayor a la provista por la zona aérea (35%). La

eficiencia de un aeropuerto no solo se limita a una de estas dos zonas sino que es necesario mantener un balance en la capacidad de ambas. Un desbalance en la capacidad de una de ellas respecto a la otra reflejaría una disminución en la capacidad del aeropuerto. Un ejemplo de esta situación es cuando el número de pasajeros procesados en un terminal es mayor a la capacidad de vuelos en la zona aérea. En este caso los procesos del terminal deben ser subutilizados para no exceder la oferta de espacios disponibles en los vuelos. Por otro lado, aunque la zona terrestre representa un factor importante en el nivel de servicio percibido por los usuarios del sistema, no se impacta directamente la capacidad del aeropuerto o demoras registradas en vuelos. Las demoras más comunes en la zona terrestre ocurren por congestión vehicular, ya sea en los accesos al aeropuerto o en las calles de circulación al edificio terminal. Por tales razones se le asigna a la zona terrestre un porcentaje menor al de las restantes zonas (20%).

Las tres zonas de un aeropuerto se subdividieron en categorías y factores. En la revisión de literatura se identifican los factores que puede utilizarse para evaluar un aeropuerto y cómo éstos pueden dividirse entre cualitativos y cuantitativos. Esta investigación se enfocó en obtener medidas cuantitativas de evaluación para conseguir un nivel de servicio en aeropuertos. Es por esto que los factores escogidos incluyen medidas temporales, espaciales y estadísticas. La Tabla 4.1 muestra los factores evaluados por el modelo desarrollado y la clasificación de cada uno de estos. Estos factores o elementos deben evaluarse mediante el uso de los criterios descritos en el capítulo 5.

Tabla 4.1 Clasificación de factores evaluados

Clasificación	Factores
Medidas de Conteo	Zona terrestre <ul style="list-style-type: none"> • Modos de transporte • Número de rutas de acceso • Número de estacionamientos Zona terminal <ul style="list-style-type: none"> • Razón de llegada de pasajeros • Número de asientos por salida Zona Aérea <ul style="list-style-type: none"> • Número de pistas • Número de salidas de pista
Medidas Temporales	Pasajeros <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de Procesamiento • Tiempo de espera o Demora • Tiempo total de servicio Vuelos <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de demora • Tiempos de ocupación
Medidas Espaciales	Zona terrestre <ul style="list-style-type: none"> • Distancias de caminata • Área de cargar y descargar pasajeros • Instalaciones peatonales Zona terminal <ul style="list-style-type: none"> • Espacio de procesamiento • Áreas de espera • Espacio para flujo de pasajeros Zona aérea <ul style="list-style-type: none"> • Pista • Calles de rodaje • Áreas de almacenaje
Medidas Estadísticas	<ul style="list-style-type: none"> • Demoras registradas anualmente • Número de vuelos de las aerolíneas

4.3 Modelo de Evaluación

A cada una de las áreas y sus subdivisiones se les asignó un peso porcentual basado en la relevancia de éstos con la operación de un aeropuerto. Cada factor es evaluado utilizando un rango de puntuación del cero al cinco; donde cinco es la puntuación máxima o excelente y cero es el mínimo o inaceptable. El nivel de rendimiento o servicio otorgado al aeropuerto está basado en la evaluación de los elementos que lo componen. La Tabla 4.2 muestra el porcentaje necesario para obtener un nivel de servicio y/o rendimiento específico. La escala de nivel de servicio o rendimiento desarrollada se basa en la definición de nivel de servicio adaptado por la IATA (1990). Esta definición se muestra y explica en la sección 2.1.1.

Tabla 4.2 Método de evaluación

Resultado de evaluación	Nivel de servicio y/o rendimiento
≥ 90	A
≥ 80 pero < 90	B
≥ 70 pero < 80	C
≥ 60 pero < 70	D
≥ 50 pero < 60	E
< 50	F

La puntuación obtenida por cada factor dependerá del resultado del criterio de evaluación utilizado. A su vez, este valor se refleja en cada categoría e igualmente en el resultado de la evaluación de las zonas por los pesos porcentuales de cada uno. Cada zona se evalúa independientemente la una de la otra y el resultado es agregado luego para definir la calificación obtenida para el aeropuerto evaluado. La Tabla 4.3 muestra la matriz de evaluación desarrollada con los porcentos asignados a cada una de las zonas, categorías y factores o elementos evaluados. Los pesos porcentuales asignados a cada división se explican en detalle en el Capítulo 5 junto con la descripción de la metodología. Los factores son evaluados utilizando una escala de cero a cinco puntos. Una puntuación de cero representa un nivel de rendimiento o servicio inaceptable mientras que una puntuación de cinco representa un nivel de rendimiento o servicio excelente.

Tabla 4.3 Modelo de evaluación de infraestructura y operación de aeropuertos

Área de Evaluación	Peso por relevancia a la infraestructura y operación de un aeropuerto		
	Zona	Categoría	Factor
	Peso	Peso	Peso
1. Zona Terrestre	20%	100%	
1.1 Acceso al Aeropuerto		35%	100%
a) Modos de transporte disponibles			50%
b) Rutas de acceso			50%
1.2 Acceso al Edificio Terminal		65%	100%
a) Estacionamiento			35%
b) Área de carga y descarga de pasajeros			45%
c) Instalaciones peatonales			20%
2. Zona Terminal	35%	100%	
2.1 Procesamiento de Pasajeros		75%	100%
a) Registro completo de pasajeros			15%
b) Auto-registro de pasajeros en kioscos			15%
c) Entrega de equipaje			15%
d) Revisión de seguridad			25%
e) Revisión de inmigración			15%
f) Reclamo de equipaje			15%
2.2 Influencias Adicionales		25%	100%
a) Dispositivos de información			40%
b) Espacio para filas y flujo de pasajeros			40%
c) Número de asientos y área de espera por salida			20%
3. Zona Aérea	45%	100%	
3.1 Configuración y Geometría		50%	100%
a) Capacidad de pistas			35%
b) Geometría de pista			15%
c) Configuración y geometría de salidas de pista			20%
d) Configuración y geometría de calles de rodaje			15%
e) Áreas almacenamiento temporero			15%
3.2 Tiempos de ocupación		50%	100%
a) Tiempo de ocupación de pista			35%
b) Tiempo de ocupación de calles de rodaje			30%
c) Tiempo de ocupación de plataforma			35%

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE AEROPUERTOS

En este capítulo se explica en detalle la metodología desarrollada para evaluar aeropuertos comerciales que operen bajo las regulaciones de la FAA. Se especifican y crean procedimientos y escalas de evaluación para lograr objetividad en el proceso. Los aeropuertos son divididos en las zonas terrestre, terminal y aérea descritas en el capítulo cuatro para lograr obtener tres evaluaciones independientes. Estas evaluaciones pueden ser agregadas para obtener la evaluación general de la infraestructura operacional del aeropuerto.

5.1 Zona Terrestre

La zona terrestre de un aeropuerto es la zona de transición entre los sistemas de transporte terrestre y el edificio terminal. Las rutas de acceso al aeropuerto primordialmente, seguido por la accesibilidad al edificio terminal, son los componentes principales de esta zona. Las vías de acceso es el primer factor a evaluarse en el diseño de la zona terrestre en un aeropuerto (ACRP, 2010). Es de suma importancia, no sólo tomar en cuenta la capacidad actual de un aeropuerto, sino que se necesita considerar ampliaciones e incrementos en la demanda al momento de diseñar las vías de acceso de un aeropuerto. En muchas ocasiones, principalmente en grandes estados, el tiempo de viaje al aeropuerto iguala o supera el tiempo de viaje del vuelo. La zona terrestre de un aeropuerto debe ser capaz de brindar servicio a los pasajeros y visitantes a la vez que maneja a los transportes de carga y los viajes de empleados. Las funciones principales de la zona terrestre es brindar circulación, distribución y almacenaje de vehículos. Los modos de transporte terrestre utilizados para brindar acceso a aeropuertos varían entre carreteras y rieles. Se considera de suma importancia la interacción entre peatones y vehículos ya que este es el principal causante de congestión y demoras en esta zona.

La accesibilidad al edificio terminal obtiene el 65% de la evaluación de la zona terrestre; esto debido a que los factores que la componen están regidos directamente por la administración del aeropuerto y no por otras entidades externas como sucede regularmente con las vías de acceso al aeropuerto. Además, esto le brinda flexibilidad al modelo para lograr cambios significativos con mejoras de bajo costo. El restante 35% se adjudica a la evaluación de la accesibilidad del aeropuerto.

5.1.1 Acceso al Aeropuerto

El acceso a un aeropuerto se compone de los modos de transporte y las rutas de acceso terrestres disponibles para arribar al aeropuerto. Se asume que ambos factores tienen un impacto similar en el nivel de servicio percibido por los usuarios del sistema por lo que se asigna un peso equivalente a ambos factores (50% a cada uno).

El transporte terrestre se divide en privado o público. Entre los modos de transporte privado que pueden estar disponibles en un aeropuerto se incluyen el auto privado, los vehículos rentados y las limosinas. El transporte público se compone de autobuses, taxis o rieles. La puntuación asignada a este factor se distribuye entre los modos de transporte que más afectan la operación del aeropuerto. Para evaluar este factor se desarrolló la Tabla 5.1. Se combinaron diferentes modos de transporte para obtener distintas puntuaciones en relación a los modos de transporte disponibles en los aeropuertos. Un aeropuerto que incluya las posibilidades de transporte privado y además sistemas de transporte públicos como taxis, autobuses y transporte sobre rieles obtiene los cinco puntos de esta evaluación. Las demás posibilidades se acreditan siguiendo las puntuaciones mostradas en la Tabla 5.1. Los modos de transporte mencionados deben estar disponibles dentro del área del aeropuerto. El acceso de los modos de transporte debe ser directo al aeropuerto y no en áreas aledañas para obtener los puntos asignados.

Tabla 5.1 Puntuación para la evaluación de modos de transporte disponibles en el aeropuerto

Modos de Transporte	Combinación de Modos	Puntos
1. Privado	Todos	5
2. Taxi	Tres opciones	3
3. Transporte colectivo	Dos opciones	1
4. Sobre rieles	Una opción	0

Las rutas de acceso a un aeropuerto se evalúan teniendo en cuenta el número de vías con destino al aeropuerto. Además, se evalúa el tipo o categoría de carretera y el nivel de servicio que ofrecen las vías con destino al sector comercial del aeropuerto en el periodo pico de tráfico de pasajeros al mismo. Para este factor, de igual forma que para el anterior, se desarrolla una escala de evaluación basada en el número y características de las vías de acceso al aeropuerto. El número de acceso toma en consideración la accesibilidad del aeropuerto mientras que las características evalúan la movilidad al aeropuerto. Las características evaluadas son la clasificación (primaria, secundaria, terciaria) y nivel de servicio de las vías. Se distribuyen los

cinco puntos de la evaluación tomando en consideración la accesibilidad y movilidad al aeropuerto. El número de rutas de acceso y la clasificación de la vía obtienen tres puntos de la evaluación mientras que los restantes dos puntos se asignan utilizando el nivel de servicio que muestran las rutas evaluadas (Tabla 5.2). En el caso del tipo de carretera y nivel de servicio que brindan las carreteras con destino a la zona terrestre, se evalúan independientemente para cada ruta de acceso a la zona comercial y se obtiene un promedio de los resultados. El nivel de servicio de la carretera debe tomar en cuenta el periodo pico del aeropuerto.

Tabla 5.2 Distribución de puntos para la evaluación de rutas de acceso al aeropuerto

Aspecto a Evaluar	Distribución de Puntos	Asignación de Puntos
Número de rutas	2	- 2 para más de una ruta de acceso - 1 para una sola ruta de acceso
Tipo de carretera	1	- 1 para carreteras principales - 0 para carreteras secundarias
Nivel de servicio	2	- 2 para nivel de servicio mayor de D - 1 para nivel de servicio D - 0 para nivel de servicio menor de D

5.1.2 Acceso al Edificio Terminal

El acceso al edificio terminal, al igual que las instalaciones para poder llegar a este destino, deben cumplir con ciertos criterios de accesibilidad, comodidad y espacio. El número de estacionamientos, áreas de carga y descarga de pasajeros y las instalaciones peatonales poseen necesidades especiales para aeropuertos, distintas a las requeridas para otras estructuras.

El área de carga y descarga de pasajeros se define como el elemento especializado más importante de un aeropuerto (Hathaway, 1995). Esto por su importancia en la transición entre un modo de transporte y otro y además por el tipo de interacción que se crea en este proceso entre peatones y vehículos. Es por esta razón que a este factor se le otorga el mayor porcentaje en el modelo (45%), seguido por la evaluación del estacionamiento e instalaciones peatonales (35% y 20%, respectivamente). Estos porcentajes se asignaron de esta forma ya que el estacionamiento causa mayor efecto en la operación de un aeropuerto mientras que las instalaciones peatonales afectan mayormente el nivel de servicio percibido por los usuarios.

5.1.2.1 Estacionamiento

Para evaluar el estacionamiento de un aeropuerto se tomaron en consideración las recomendaciones provistas por las guías de diseño de la FAA (1988). Según estas guías, el

número de estacionamientos que necesita un aeropuerto se puede estimar de tres formas. El primer método estima el número de estacionamientos necesarios mediante la razón de espacios por embarque anual de pasajeros. Estudios han mostrado que esta razón puede variar entre 1,000 a 3,300 espacios de estacionamiento por cada millón de pasajeros embarcados anualmente. Por ejemplo, la Asociación de Carreteras y Transporte de Canadá recomienda de 900 a 1,200 espacios de estacionamiento por cada millón de pasajeros embarcados anualmente en aeropuertos pequeños. El segundo método multiplica los embarques a la hora pico por un factor de 1.5. El tercer método requiere la recolección de datos del estacionamiento incluyendo datos de día y hora pico para el tiempo de ocupación de los estacionamientos y tasa de ocupación. Aunque el tercer método es el más preciso de los tres utilizados por la FAA, requiere un tiempo de recolección de datos extenso en comparación con los dos métodos alternos (ACRP, 2010).

Se evalúa el número de estacionamientos de un aeropuerto utilizando el número de pasajeros embarcados anualmente o 1.5 veces el número de pasajeros embarcados a la hora pico del aeropuerto. La Figura 5.1 se utiliza para determinar el número de estacionamientos necesarios en aeropuertos con un número de embarques anuales de hasta 4.0 millones (primer método). Aeropuertos con un número de embarques anuales mayor a 4.0 millones se evalúan multiplicando por 1.5 el número de embarques a la hora pico del aeropuerto (segundo método).

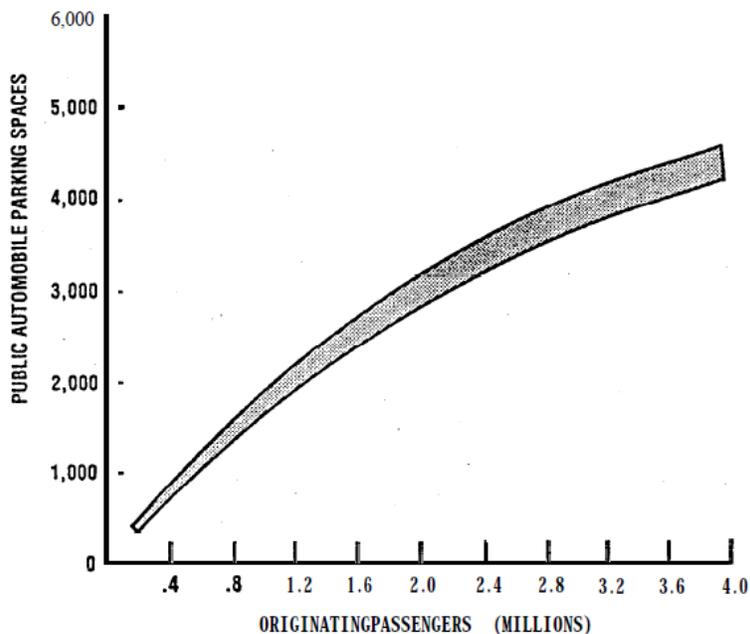


Figura 5.1 Número de estacionamientos en una muestra de aeropuertos por el número de pasajeros embarcados anualmente (FAA, 1988)

El estacionamiento de un aeropuerto debe estar dividido en estacionamientos de corta y larga duración. El estacionamiento de corta duración se conoce comúnmente como estacionamientos de un periodo igual o menor a tres horas. El estacionamiento de larga duración brinda espacios para periodos mayores a tres horas. Se recomienda asignar entre un 70 a 85 por ciento de los estacionamientos disponibles para periodos de corta duración y el restante 15 a 30 por ciento a estacionamientos de larga duración (PRPA, 1995).

La evaluación de este factor se divide en el cumplimiento del aeropuerto con el número de estacionamientos necesarios y la asignación de estacionamientos de corta y larga duración. Se considera de mayor importancia el cumplimiento con el número de estacionamientos necesarios que la división de estacionamientos entre corta y larga duración por lo que se asignan tres puntos a la evaluación del número de estacionamientos necesarios y dos puntos a la división de los estacionamientos entre corta y larga duración. Se desarrolla una escala de evaluación para el número de estacionamientos necesarios (Tabla 5.3), donde el cumplimiento con el número necesario de estacionamientos obtiene la mayor puntuación y un número de estacionamientos menor al 75% de los estacionamientos necesarios recibe la menor puntuación.

Tabla 5.3 Distribución de puntos asignados a la evaluación del estacionamiento de un aeropuerto

Aspecto a evaluar	Oferta vs demanda teórica (calculada)	Puntos
Número de Estacionamientos	Oferta \geq Demanda	3
	Oferta \geq 80% pero $<$ 100% Demanda	2
	Oferta \geq 75% pero $<$ 85 Demanda	1
	Oferta $<$ 75% Demanda	0
Estacionamientos de corta y larga duración	Corta duración y larga duración separados	2
	No se separan	1
	No se ofrece el servicio	0

5.1.2.2 Áreas de carga y descarga de pasajeros

El diseño y mantenimiento efectivo de áreas de carga y descarga de pasajeros frente a cada terminal es de suma importancia para lograr un flujo eficiente y seguro de los vehículos y peatones que transitan por esta zona. La carretera de acceso al terminal debe ofrecer el espacio y el número de carriles recomendado para lidiar con la demanda de vehículos esperada incluyendo el estacionamiento momentáneo de vehículos en los carriles próximos a la entrada del terminal. Además, el terminal debe proveer el encintado necesario para acomodar el número de pasajeros utilizando la entrada del terminal en los periodos pico del día.

Para lograr un nivel de servicio satisfactorio en el conjunto de estos elementos la FAA provee dimensiones mínimas y recomendadas para cada uno de estos elementos en frente del edificio terminal. La Figura 5.2 muestra las dimensiones recomendadas por la FAA para un edificio terminal de mediana y alta capacidad.

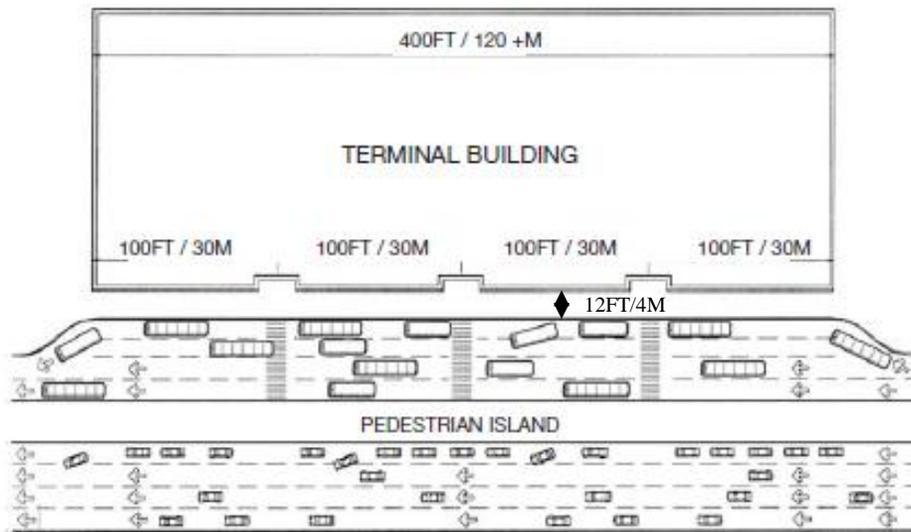


Figura 5.2 Dimensiones recomendadas por la FAA para encintado de aeropuertos de mediana y alta capacidad (ACRP, 2010)

Entre las dimensiones se recomienda un mínimo de 12 pies de acera para permitir el paso simultáneo de dos pasajeros con maletas y 25 pies si se utiliza el encintado para realizar el procesos de registro (ACRP, 2010). Se ha observado que la localización de las puertas de entrada y salida de un terminal tienen un efecto en la utilización del encintado del terminal al igual que en la percepción de nivel de servicio de los pasajeros. Las observaciones indican que los conductores se estacionan a no más de tres vehículos de distancia (50 a 60 pies) de una puerta de acceso al terminal, incluso si para esto es necesario ocupar un carril adicional. Por lo tanto, para promover el mayor uso del largo de encintado se recomienda espaciar a un máximo de 100 a 120 pies de distancia las puertas de acceso al terminal, como se muestra en la Figura 5.2. En adición, es recomendado un mínimo de tres carriles en la vía de acceso al edificio terminal. Para aeropuertos que manejen un número significativo de embarques de pasajeros anualmente, el número de carriles recomendados aumenta a cuatro debido al uso de doble estacionamiento y transiciones en el segundo carril más cercano al encintado en periodos pico del aeropuerto. El tercer carril puede ser utilizado como carril de transición para los vehículos estacionándose y viceversa. El cuarto y quinto carril (para aeropuertos de gran capacidad) debe ser designado para

vehículos que no deseen realizar una parada en dicho terminal. La Tabla 5.4 muestra las dimensiones recomendadas de los elementos mencionados.

Tabla 5.4 Dimensiones recomendadas por la FAA para el encintado frente al Terminal A

Elemento	Dimensiones recomendadas por la FAA
1. Espacio entre puertas del terminal	100 -120 ft, máximo
2. Encintado frente al terminal	12 ft, mínimo
3. Número de carriles	3(*pequeño), 3-4 (*mediano), 4-5(*grande)

*Capacidad del aeropuerto

La evaluación se lleva a cabo considerando la capacidad del aeropuerto establecida por el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI, por sus siglas en inglés). La ACI establece aeropuertos de alta capacidad los aeropuertos que manejan el 1% o más de los embarques anuales registrados en los aeropuertos regulados por la FAA. Los aeropuertos de mediana capacidad son aquellos con una demanda de entre 1% y 0.25% de los embarques anuales y los aeropuertos pequeños manejan demandas menores al 0.25% de los embarques anuales pero mayores a 0.05% (ACI, 2009).

El número de carriles y el largo del encintado que se ofrecen en el área de carga y descarga de pasajeros son los aspectos más importantes en la operación de la zona terrestre; por tal razón se asignan dos puntos a la evaluación de cada uno de estos. El punto restante de la evaluación se asigna al espacio provisto entre puertas de entrada al terminal.

5.1.2.3 Instalaciones Peatonales

Las instalaciones peatonales de acceso a un terminal tienen un impacto significativo en la percepción de nivel de servicio de los pasajeros. Para determinar el nivel de servicio que brinda la trayectoria designada para el paso peatonal desde un estacionamiento hasta un terminal se evalúan las medidas de las aceras y cruces peatonales a lo largo del trayecto y se comparan con las dimensiones recomendadas por la ACRP. El capítulo 3 del libro verde desarrollado por la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Funcionarios de Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) provee valores de diseño para instalaciones peatonales en zonas urbanas. Sin embargo, muchas de las recomendaciones de diseño de instalaciones peatonales en aeropuertos son más estrictas debido a la necesidad de espacio para el equipaje. Un ejemplo de esto es el ancho recomendado de acera el cual es 5 pies para zonas urbanas y 12 pies para aeropuertos (AASHTO, 2004).

En la evaluación de este criterio se toman en cuenta diferentes factores y estos se encuentran mostrados en la Tabla 5.5 con su respectiva puntuación.

Tabla 5.5 Elementos evaluados para las instalaciones peatonales de la zona terrestre

Elemento	Dimensiones recomendadas por la FAA	Puntuación
1. Distancia hasta el terminal y vice versa	1000 ft	1
2. Ancho de aceras	12 ft, mínimo	1
3. Identificación y marcado de cruces	-	1
4. Cruces peatonales a desnivel	-	1
5. Instalaciones para discapacitados	-	1

La evaluación de la distancia que pueden caminar los pasajeros desde o hacia el edificio terminal se evalúa mediante la distancia máxima recomendada por la FAA de 1,000 pies. Para obtener el punto se debe proveer una distancia menor a la recomendada desde y hacia cualquier terminal. El ancho de aceras debe cumplir con el mínimo requerido para el trayecto hacia cualquier terminal. Los cruces peatonales deben estar debidamente marcados y se otorga un punto por utilizar cruces a desnivel o puentes peatonales. El trayecto desde y hacia el terminal debe permitir el paso de personas con discapacidades y estos elementos deben estar debidamente identificados para obtener el punto asignado.

5.2 Zona Terminal

El edificio terminal es la zona en donde mayor tiempo de demora se genera en un aeropuerto, ya sea en los procesos necesarios para un pasajero partiendo de su origen o un pasajero llegando a su destino. Esto debido al número de procesos que componen esta zona de migración entre un modo de transporte y otro. El procesamiento de pasajeros y el área segura son los componentes de evaluación del edificio terminal evaluado por el modelo. A continuación se describe en detalle la metodología desarrollada para lograr evaluar esta zona de transición.

5.2.1 Procesamiento de Pasajeros

El procesamiento de pasajeros en un terminal es la fase que más tiempo consume a los pasajeros y por lo tanto uno de los factores más importantes al evaluar el nivel de servicio que brinda un aeropuerto. Además, es necesario crear un balance entre el número de pasajeros procesados en el período pico del aeropuerto y el número de vuelos durante el mismo periodo.

La evaluación de la fase de procesamiento se divide en dos partes. En la primera parte se consideran los tiempos de espera, tiempo de servicio y largo de fila de pasajeros para cada uno de los procesos en un terminal, mientras que la segunda parte considera las dimensiones de las

áreas provistas en cada uno de los procesos. El procesamiento de pasajeros es evaluado utilizando escalas de evaluación y dimensiones recomendadas por la ACRP.

En el modelo matricial desarrollado se asigna el mismo peso porcentual a todos los procesos, excepto por el proceso de revisión de seguridad. Esto ya que todos los procesos representan, de una forma u otra, una parte esencial de la operación funcional de un aeropuerto. El proceso de revisión de seguridad obtiene un porcentaje adicional por la condición de que tiene que manejar un mayor número de procesos y pasajeros; y ahora más aún después de todas las precauciones tomadas por concepto de los ataques terroristas que han sacudido recientemente a los Estados Unidos. Por tales razones, todos los procesos resultan con un 15% del peso total de la categoría, excepto por el proceso de revisión de seguridad cuyo peso es de 20%.

5.2.1.1 Determinación de tamaño de muestra para evaluación de procesos en un terminal

La evaluación de un proceso requiere la obtención de datos representativos de la población a evaluarse. A continuación se muestran los pasos para determinar la muestra requerida para evaluar los procesos incluidos en la evaluación de un terminal.

5.2.1.1.1 Población

La población de los procesos en un terminal es distinta para cada proceso por lo que se divide la población de pasajeros por cada proceso evaluado. Resultan las siguientes poblaciones:

- población de pasajeros que realiza proceso de registro con empleado,
- población de pasajeros que realiza proceso de registro en kioscos,
- población de pasajeros que realiza proceso de entrega de equipaje,
- población de pasajeros que realiza proceso de inspección de seguridad,
- población de pasajeros que realiza proceso de inspección de inmigración,
- población de pasajeros que realiza proceso de reclamo de equipaje.

5.2.1.1.2 Entidad y unidades de medida y/o conteo

Una entidad es una representación de un objeto que requiere una definición explícita (Bartolomei, 2011). En un terminal de un aeropuerto la entidad puede definirse como el pasajero, el equipaje o ambos. En este proceso solo se toma en consideración el pasajero por lo que esta es nuestra entidad. Sin embargo, en los procesos de un terminal un conjunto de pasajeros se cataloga como grupo de pasajeros. La definición de grupo de pasajeros puede ser distinta dependiendo del objetivo con el que se colecte la información. Las aerolíneas generalmente definen como grupo de pasajeros a los pasajeros que viajan bajo el mismo registro. Sin embargo,

también puede definirse como grupo a un número grande de pasajeros, como por ejemplo de una misma excursión, aunque tengan registros separados. Para el propósito de evaluación de los procesos en un terminal es necesario conocer el número de pasajeros que se registra simultáneamente en los procesos donde ocurra este fenómeno. La Tabla 5.6 muestra en qué procesos debe registrarse el tiempo de procesamiento por grupo o individuo.

Tabla 5.6 Datos por grupo o individual para tiempo de procesamiento de pasajeros (ACRP, 2008)

Proceso	Dato por grupo o individuo
Registro con empleado	Grupo
Registro en kioscos	Grupo
Entrega de equipaje	Grupo
Inspección de seguridad	Individual
Inspección de inmigración	Grupo
Reclamo de equipaje	Grupo

Las unidades de medida de tiempo para los procesos en un terminal regularmente se toman en minutos por lo que seguimos esta norma al utilizar los minutos como la unidad de medida. Sin embargo, en los procesos de un terminal se pueden definir los tiempos de procesamiento en diferentes perspectivas. Por ejemplo, el tiempo de servicio de registro con un empleado puede medirse en relación al recurso o en relación al pasajero y ambas medidas serían diferentes. El tiempo de servicio de un pasajero o grupo de pasajeros comienza cuando el pasajero llega a la mesa de registro y termina cuando este se retira hacia el próximo proceso. Sin embargo, el tiempo de servicio en relación al recurso comienza cuando el recurso solicita que pase el siguiente pasajero y termina cuando este vuelve a solicitar un próximo pasajero (asumiendo que hay pasajeros esperando en fila). Esto crea una gran diferencia en los resultados dependiendo de la perspectiva en que se tomen los datos. Para esta evaluación se considera el nivel de servicio percibido por los pasajeros y por esta razón deben tomarse los datos desde la perspectiva del pasajero en todos los procesos del terminal.

5.2.1.1.3 Datos

Para determinar el nivel de servicio de los procesos en un terminal es necesario definir las métricas que se toman en consideración. En el caso de este procedimiento se evalúa el tiempo de procesamiento de pasajeros en los procesos de un terminal de aeropuerto. Las métricas que se toman en consideración por cada proceso son: (1) el tiempo en fila o tiempo de espera, (2) tiempo de servicio, (3) número de pasajeros por grupo. Para determinar un tiempo promedio de

espera y servicio por pasajero es necesario identificar el número de pasajeros al que se brinda servicio simultáneamente en los procesos que lo ameriten (identificados en la Tabla 5.6).

5.2.1.1.4 Error

Todas las medidas tomadas de cualquier tipo de sistema contienen error. Es por esto que es necesario definir el porcentaje máximo de error que se está dispuesto a tolerar en una muestra representativa de una población. Regularmente se utilizan porcentos de error entre 3%, y 5%, aunque se deja abierta la posibilidad de utilizar el porcentaje de error permisible que el evaluador considere justificable para el terminal evaluado.

5.2.1.1.5 Nivel de confianza

El nivel de confianza de una muestra permite interpretar los resultados con un porcentaje específico de certeza en la postura asumida. Por lo general se utilizan niveles de confianza entre 90%, 95% y 99%, siendo el 95% el nivel de confianza más utilizado. Para esta evaluación se recomienda utilizar un nivel de confianza de 95%. La Tabla 5.7 muestra el valor de Z para los niveles de confianza más comúnmente usados. Estos valores de Z se utilizan en la determinación de un tamaño de muestra.

Tabla 5.7 Valores de Z para distintos niveles de confianza

Nivel de Confianza	Valor de Z
90%	1.645
95%	1.96
99%	2.58

5.2.1.1.6 Muestra piloto

En una muestra piloto (mínimo 15 a 20 observaciones) se tomarán datos de tiempo de servicio para cada proceso. Además, se tomará el número de pasajeros por grupo y el número de equipajes registrado por pasajero. El número de pasajeros por grupo se obtiene de los procesos indicados en la Tabla 5.6 mientras que el número de equipajes que se registra por pasajero se obtiene en los procesos de registro con empleado y entrega de equipaje. Para grupos de pasajeros se puede identificar el total de equipajes registrados y luego dividirlo entre el número de pasajeros que componen el grupo para determinar el número de equipajes por pasajeros del grupo.

De esta muestra piloto se debe obtener la varianza del tiempo de servicio por cada pasajero. Se debe identificar también la medida en que varía el número de equipajes de cada pasajero en el tiempo de servicio de los procesos afectados. Basado en los resultados de la

muestra piloto y utilizando su juicio, el evaluador debe decidir si se debe incluir la métrica de equipajes por pasajero en los datos que se tomarán de la muestra determinada.

5.2.1.1.7 Tamaño de muestra para un promedio

En el informe de ACRP (2008) se recomiendan dos formas de determinar el tamaño de muestra necesario para trabajos de investigación en aeropuertos. La fórmula recomendada por el ACRP (2008) para determinar el tamaño de muestra representativo para determinar un promedio se muestra en la ecuación 5.1.

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{e^2} \quad (5.1)$$

donde,

n = Tamaño de muestra,

Z = Valor asociado al nivel de confianza escogido,

σ = Desviación estándar de muestra piloto, y

e = Error que se está dispuesto a tolerar

Para este procedimiento utilizamos la desviación estándar de la muestra piloto para determinar la varianza necesaria para calcular el tamaño de muestra. El error se obtiene de la multiplicación del error tolerable por el promedio de tiempo de servicio de la muestra piloto. El tamaño de muestra obtenido se basa en datos por cada pasajero por lo que los grupos de pasajeros cuentan por el número de pasajeros que lo compongan. De obtener un tamaño de muestra muy elevado el evaluador deberá considerar incorporar un atributo adicional que considere necesario. Por ejemplo, número de equipajes de pasajero o recursos disponibles. Este atributo dividiría la población del proceso evaluado y generará una nueva población con un número menor de muestra. Otro método para lograr disminuir el tamaño de muestra es determinando los datos atípicos mediante un proceso de reducción de datos. De este modo se logra disminuir la desviación estándar de los datos y por consiguiente el tamaño de muestra necesario.

5.2.1.1.8 Estrategia de muestreo

En la literatura se definen tres métodos básicos de muestreo: probabilístico, intencional y muestra sin norma. El muestreo probabilístico brinda a cada entidad la misma probabilidad de ser elegido. Para el método intencional se selecciona la población con el fin de obtener una muestra representativa, Sin embargo, esta representatividad es subjetiva ya que depende de la

opinión tomada en consideración para definir la población. En el muestreo sin norma se toma muestra sin ningún procedimiento definido por lo que la muestra es representativa si la población es homogénea y no se producen sesgos de selección.

El muestreo probabilístico es el tipo de muestreo mayormente utilizado, ya que asegura la representatividad de la muestra y permite el cálculo de errores (Lagares y Puerto, 2001). Permite la abstención de datos por medio de diferentes estrategias de muestreo (ACRP, 2008):

Muestreo estratificado – Se divide la población por una característica en particular. Por ejemplo, la división de pasajeros por clase ejecutiva o económica.

Muestreo sistemático – Se divide la población escogiendo la muestra cada cierto número de entidades hasta lograr el tamaño de muestra representativo. Por ejemplo, tomar la muestra de tiempo de servicio cada cinco pasajeros. Para evitar un sesgo se sugiere comenzar a tomar la muestra con un número aleatorio.

Muestreo por conglomerado – Conglomerados es un conjunto de unidades, como por ejemplo vuelos, puertas de vuelos o un terminal en específico. Se utilizan los conglomerados cuando resulta difícil definir una lista de entidades (Por ejemplo, pasajeros llegando en un periodo de tiempo específico). En este ejemplo sería conveniente dividir los pasajeros por las puertas de los vuelos al terminal y de esta forma se podría elegir un muestreo aleatorio de las puertas. La muestra debe guardar la heterogeneidad de la población y al mismo tiempo la homogeneidad de la muestra.

La estrategia de muestreo recomendada para los datos que se deben tomar en este procedimiento es un muestreo sistemático. Este tipo de muestreo facilita y agiliza la toma de datos en campo.

5.2.1.2 Escalas de nivel de servicio

El artículo publicado por la ACRP, *Passenger Level of Service and Spatial Planning for Airport Terminals*, resume un estudio llevado a cabo para crear escalas de medida de nivel de servicio para los espacios y tiempos de espera en el procesamiento de pasajeros (ACRP, 2008). El objetivo principal de este estudio fue determinar el espacio necesario para pasajeros y desarrollar una guía para el nivel de servicio de áreas funcionales de un terminal.

En este estudio se tomaron datos de procesamiento de pasajeros; además de realizar una encuesta por cada proceso y áreas funcionales de los terminales de varios aeropuertos. Se recogieron datos en siete aeropuertos alrededor de Estados Unidos. Los aeropuertos pasaron por

un proceso de elección tomando en cuenta el tamaño, posición geográfica y funciones. Los autores se basaron en esta elección para añadir representatividad a la muestra y poder evaluar los datos como la población de pasajeros comerciales a nivel nacional. Además, los autores mencionan incluir pasajeros de distintos rasgos demográficos y procedencias, desde ejecutivos viajando solos hasta grandes familias de vacaciones. Se determinó la hora pico para cada proceso y se tomaron los datos de forma personal durante un periodo que incluyera las horas pico determinadas. Los datos incluyeron el tiempo en fila o de espera, número de pasajeros en fila y espacio disponible por pasajero.

La encuesta se realizó con el fin de definir las variables significativas en la evaluación de las áreas funcionales en un terminal. Se distribuyó una encuesta por proceso o área funcional. Una investigación etnográfica se llevó a cabo enfocada en el procesamiento de pasajeros. En las áreas de espera, se realizó una encuesta con el objetivo de evaluar la visión holística de la experiencia de los pasajeros en el aeropuerto.

Los datos de procesos fueron analizados utilizando una prueba t para determinar diferencia significativa entre los grupos A y B mostrados en la Tabla 5.8.

Se analizaron los datos tomados para los procesos de: registro con empleado, registro en kioscos, revisión de seguridad y reclamo de equipaje. Los resultados de las pruebas t mostraron diferencia significativa en todas las condiciones de los distintos tiempos de espera de los procesos analizados (excepto la condición 5 del registro por medio de kioscos). Sin embargo, la investigación no logró reflejar diferencia significativa entre el espacio provisto por pasajero y la percepción de estos.

Tabla 5.8 Desglose de condiciones evaluadas para determinar diferencia significativa en tiempos de espera de procesos (ACRP, 2008)

Condición de prueba para tiempo de espera	Grupo A	Grupo B
Condición 1	Tiempo de espera ≤ 5 min.	Tiempo de espera > 5 min.
Condición 2	Tiempo de espera ≤ 10 min.	Tiempo de espera > 10 min.
Condición 3	Tiempo de espera ≤ 15 min.	Tiempo de espera > 15 min.
Condición 4	Tiempo de espera ≤ 20 min.	Tiempo de espera > 20 min.
Condición 5	Tiempo de espera ≤ 30 min.	Tiempo de espera > 30 min.

Las condiciones analizadas por el estudio de ACRP fueron utilizadas para desarrollar escalas de nivel de servicio. La Tabla 5.9 muestra los intervalos utilizados para valorar el tiempo de espera para cada uno de los servicios en un terminal. El tiempo de espera representa dos

puntos del máximo de cinco en la evaluación de cada proceso. También se muestran en la Tabla 5.9, la puntuación otorgada a cada nivel de servicio. Esta misma escala se utiliza para evaluar el tiempo de servicio de los procesos en un terminal con la única diferencia que se asigna solo un punto del total de la evaluación a este tiempo.

Tabla 5.9 Nivel de servicio del tiempo de espera y tiempo de servicio en procesos de pasajeros en terminales de aeropuertos

Tiempo de espera o Tiempo de servicio (min)	Nivel de Servicio	Puntuación Tiempo de Espera	Puntuación Tiempo de Servicio
≤ 5	A	2.0	1.0
$> 5 \text{ y } \leq 10$	B	1.60	0.8
$> 10 \text{ y } \leq 15$	C	1.20	0.6
$> 15 \text{ y } \leq 20$	D	0.80	0.4
$> 20 \text{ y } \leq 30$	E	0.40	0.2
> 30	F	0	0

La capacidad de pasajeros en fila debe ser estimada tomando en consideración las dimensiones del espacio provisto para fila en los distintos procesos. Los pasajeros en fila ocupan comúnmente un espacio de dos pies por pasajero para los procesos en un aeropuerto (Neufville, 2007). Durante la toma de datos se debe registrar el largo de fila máximo obtenido por cada proceso. Este largo de fila máximo se debe comparar con la capacidad estimada de fila. El largo de fila máximo debe ser menor a la capacidad estimada de fila del proceso para obtener el punto otorgado a la evaluación de este factor.

5.2.1.3 Evaluación de áreas de procesamiento

La segunda parte de la evaluación de procesos en un terminal toma en cuenta las dimensiones de los espacios provistos para el flujo, espera y servicio de los pasajeros. A este factor de dimensiones se le asigna un punto del total de la evaluación de cada proceso. Las dimensiones medidas en el terminal evaluado se contrastan con las dimensiones recomendadas por las guías de diseño de terminales de la ACRP para determinar su cumplimiento en esta evaluación.

En la Figura 5.3 se muestran las dimensiones mínimas y recomendadas por la ACRP para la configuración más común del proceso de registro y entrega de equipaje. El proceso de registro puede ser con un empleado o en kioscos que muestren la formación de un espacio para fila en serpentina. Para registro en kioscos que no muestren un espacio designado para filas, la ACRP recomienda un espacio de 8 pies en frente de las máquinas de auto-registro. Los registros en el

área del encintado del terminal deben proveer un espacio mínimo de 22 pies frente al mostrador para asegurar un servicio cómodo y seguro (ACRP, 2010). El espacio necesario frente al mostrador, no aplica para el proceso de revisión de seguridad ya que, por lo regular, un empleado de la Administración de Seguridad en la Transportación (TSA, por sus siglas en inglés) no atiende grupos grandes simultáneamente y estos no deben cargar equipaje pesado en esta área.

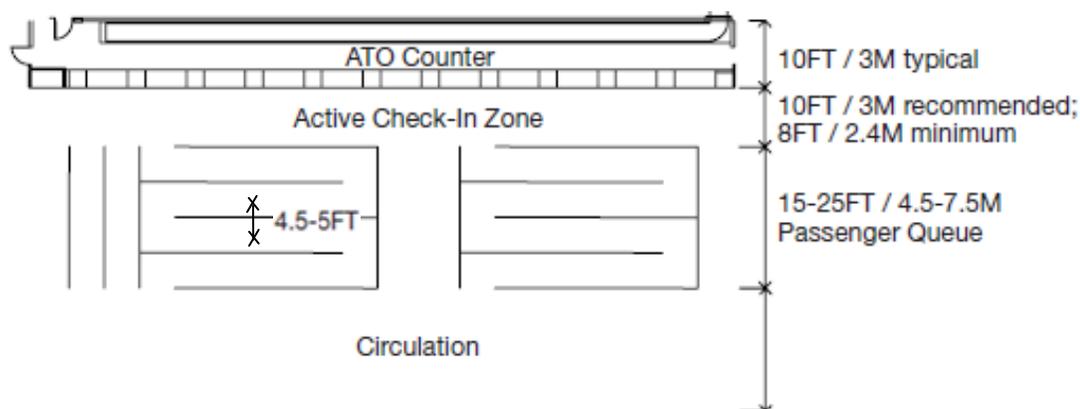


Figura 5.3 Dimensiones recomendadas para la configuración más común del proceso de registro y entrega de equipaje (ACRP, 2010)

El espacio provisto para contener la fila cuya forma de serpentina representa la mayoría de los casos en terminales de aeropuertos es evaluado con las dimensiones mostradas en la Figura 5.3. El ancho de los segmentos rectos y ancho de curvas en las serpentinadas de los distintos procesos deben ser medidos y se deben evaluar las medidas más restrictivas en ambos elementos. El incumplimiento del espacio más restrictivo con el mínimo necesario representa la pérdida de la puntuación asignada a esta medida.

El área de seguridad muestra una medida de ancho de área de procesamiento, la cual se encuentra comúnmente entre 27 a 31 pies para la configuración de un detector de metales por cada línea de revisión de equipaje. Según informes de TSA, estas medidas brindan el espacio necesario para proveer un nivel de servicio satisfactorio para esta configuración (ACRP, 2010). Dos líneas de rayos X por cada detector de metales resulta en una disminución del espacio requerido a entre 22 y 29 pies como se muestra en la Figura 5.4. En la figura se muestra una configuración adicional en la cual se utiliza un detector de metales y un rastreador de cuerpo entero por cada línea de rayos X. La utilización de esta configuración se ha vuelto popular luego de los atentados del 9/11 en EE.UU.

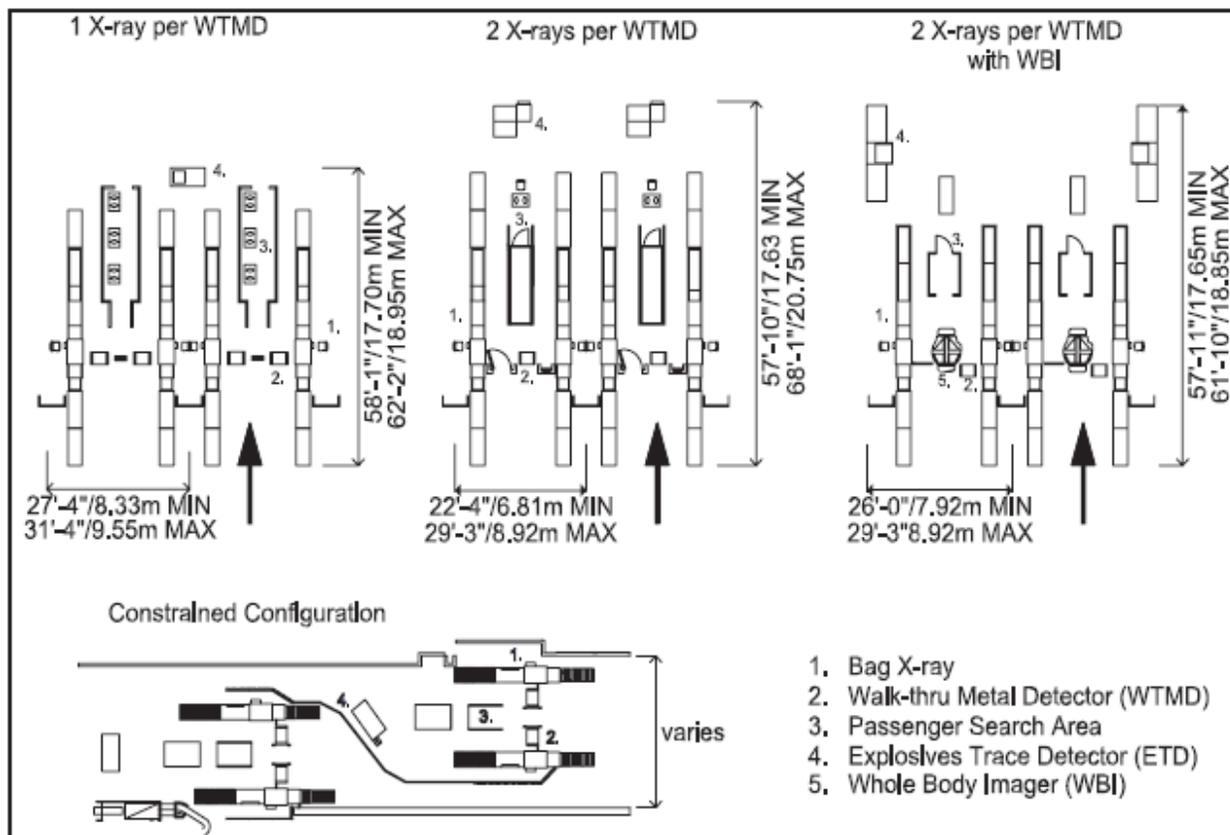


Figura 5.4 Dimensiones recomendadas para las diferentes configuraciones de procesos de revisión de seguridad (ACRP, 2010)

El resumen de las dimensiones evaluadas para los procesos de salida en un terminal se muestra en la Tabla 5.10. Los datos mostrados constituyen las dimensiones comúnmente utilizadas en terminales de aeropuertos para los procesos de registro, entrega de equipaje y revisión de seguridad. Estas recomendaciones pueden variar dependiendo del caso, es por esto que se debe corroborar su utilización con las variantes expuestas en esta sección.

Tabla 5.10 Resumen de dimensiones recomendadas para los procesos en terminales de Aeropuerto (ACRP, 2010)

Espacio	Dimensiones ACRP (pies)	
	Mínimo	Recomendado
Mostrador a fila	8	10
Serpentina	15	15-25
Ancho de segmento recto en serpentina	4.5	4.5-5
Ancho de viraje en serpentina	5	5
Ancho de área de procesamiento (revisión de seguridad)	27	27-31

En total se evalúan cuatro espacios para cada uno de los tres procesos evaluados por lo que se divide el punto asignado a este factor entre cuatro para obtener un total de 0.25 puntos por cada espacio evaluado (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 División de puntos asignados por dimensiones para los procesos de registro, entrega de equipaje y revisión de seguridad

Espacio	Registro	Entrega de Equipaje	Revisión de Seguridad
Mostrador a fila	0.25	0.25	N/A
Serpentina	0.25	0.25	0.25
Ancho de segmento recto en serpentina	0.25	0.25	0.25
Ancho de viraje en serpentina	0.25	0.25	0.25
Ancho de área de procesamiento	N/A	N/A	0.25
Total	1	1	1

Los procesos que componen la llegada de pasajeros a su destino final son el proceso de revisión de inmigración y reclamo de equipaje. Estos procesos muestran dimensiones diferentes a los procesos de salida debido a sus funciones. La Figura 5.5 muestra las dimensiones recomendadas por la Aduanas y Protección Fronteriza de los EE.UU. (CBP, por sus siglas en inglés) para una configuración típica de revisión de inmigración mientras que la Figura 5.6 muestra las dimensiones para los dos sistemas típicos de reclamo de equipaje.

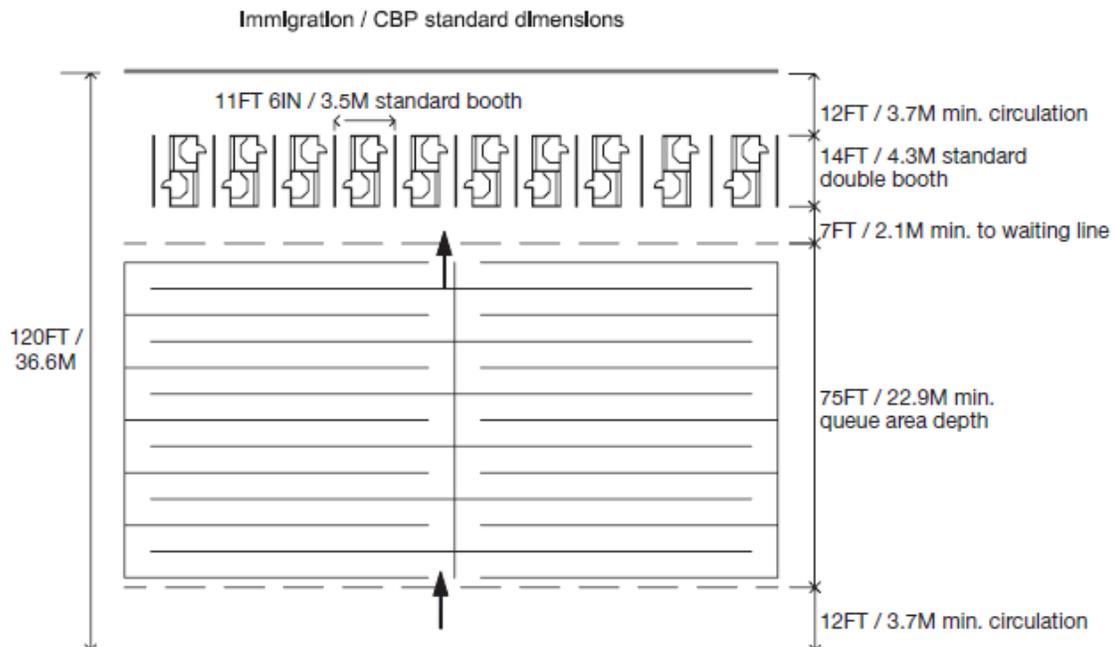


Figura 5.5 Dimensiones recomendadas para la configuración típica del proceso de revisión de inmigración (ACRP, 2010)

La CBP recomienda un espacio mínimo para fila de 75 pies en forma de serpentina para aeropuertos de alta demanda y 50 pies para aeropuertos pequeños para el proceso de revisión de inmigración. Ambas con un espacio de cinco pies de ancho. Esta serpentina debe estar a una separación mínima de siete pies de las cabinas de revisión. Se recomienda una fila para residentes y otra para ciudadanos extranjeros aunque no necesariamente de las mismas dimensiones como se muestra en la figura anterior. Para este proceso se evalúan las tres dimensiones mencionadas ya que se consideran las medidas directas de la percepción de nivel de servicio para un pasajero. Dividiendo el número de medidas evaluadas entre el punto asignado a las dimensiones de este proceso obtenemos 0.33 puntos por medida. Los puntos se obtienen, al igual que en los otros procesos, si la medida es igual o mayor al valor mínimo necesario.

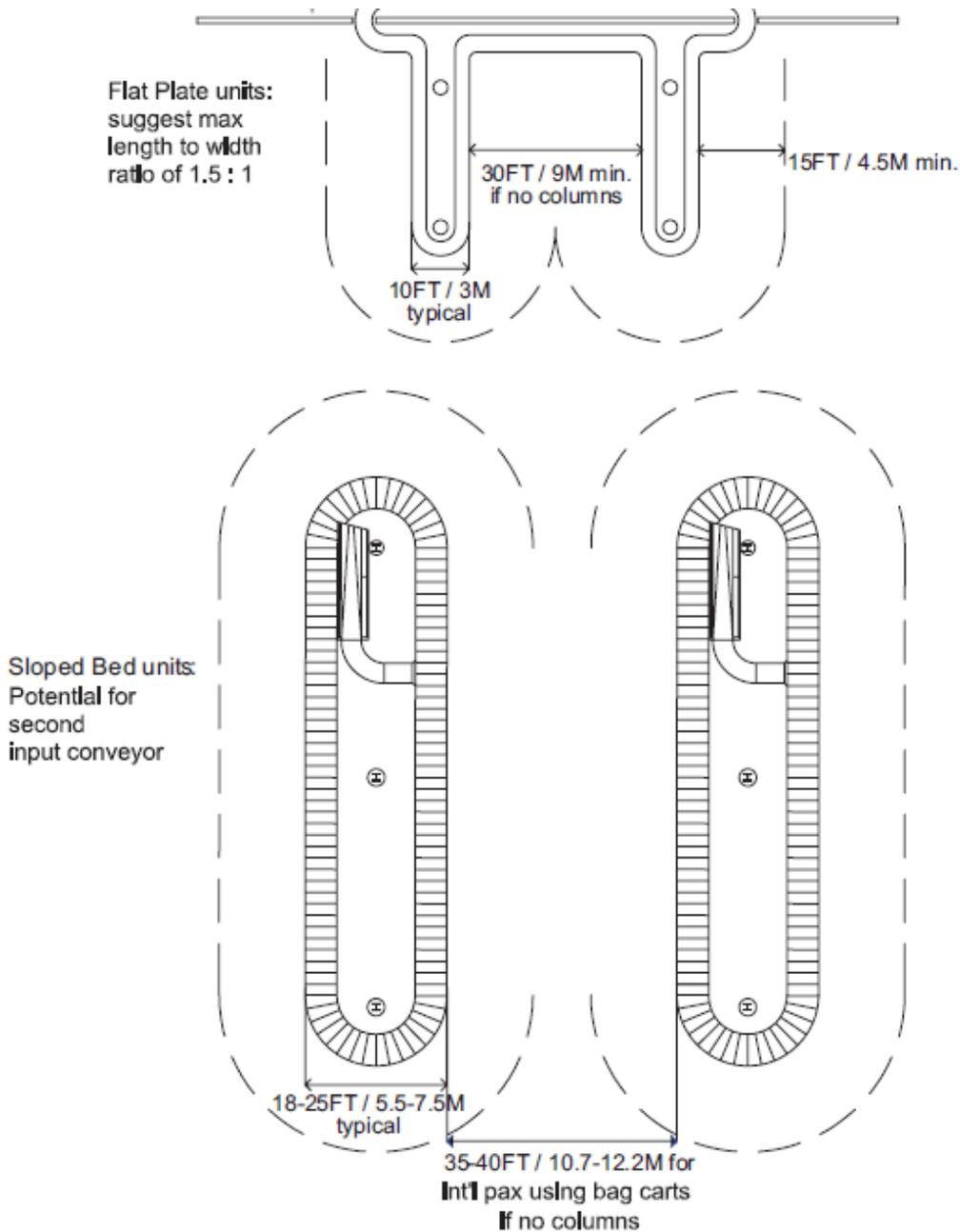


Figura 5.6 Dimensiones recomendadas para los sistemas típicos de reclamo de equipaje (ACRP, 2010)

Según las dimensiones mostradas en la Figura 5.6, la configuración de placa horizontal debe poseer un radio mínimo de 15 pies alrededor de la correa y 10 pies de diámetro en la curva de las correas. Además, se recomienda una razón máxima de 1.5 pies de largo por un pie de ancho. Para el caso de una correa inclinada se utiliza un diámetro de entre 18 y 25 pies de correa y un espaciamiento entre correas de entre 35 y 40 pies. Cada medida en la configuración de correa horizontal representa 0.20 puntos del punto asignado a la evaluación de las dimensiones

de los procesos. El 0.20 restante del punto en esta área se atribuye a la razón de largo por ancho de las correas transportadoras horizontales. De igual forma para una correa inclinada, se divide la puntuación asignada entre las dos dimensiones evaluadas (0.5 puntos para el diámetro de correa y 0.5 puntos para el espaciado entre correas).

5.2.2 *Influencias Adicionales en un Terminal*

Además del tiempo y dimensiones del procesamiento de pasajeros, en un terminal se deben tomar en consideración el uso y ubicación de dispositivos de información, el espacio disponible para filas y flujo, y el número de asientos y área de espera disponibles.

La distribución de pesos para estos elementos se llevó a cabo considerando su relación con la operación eficiente de un terminal. Los dispositivos de información y el espacio disponible para flujo obtienen un mayor peso en el modelo debido a que guardan relación directa con el movimiento de pasajeros. El número de asientos y área disponible por salida se consideran elementos de comodidad y no necesariamente de operación, por lo que se le asigna un peso menor que a los demás elementos evaluados.

5.2.2.1 Dispositivos de información

Los dispositivos de información en terminales incluyen los rótulos y pantallas informativas. Estos dispositivos deben orientar efectivamente al pasajero en cuanto a la ubicación de salidas, ubicación de los diferentes modos de transporte disponibles e información sobre vuelos. Además, deben contener información y una ubicación estratégica para llevar la información eficientemente tomando en cuenta el ambiente que los rodea.

Recientemente, la ACRP publicó lo que ellos denominan como la guía más actualizada para indicar a los operadores de aeropuertos las mejores prácticas en la señalización de terminales de aeropuertos (ACRP, 2011b). Para la evaluación de los dispositivos de información se utilizan los cinco requerimientos establecidos por la ACRP en su publicación:

Conspicuo – El color y brillo de los rótulos debe generar un contraste llamativo para poder ser detectado sobre rótulos alrededor. Deben ser colocados donde se espera verlos.

Concisos – Es poco probable que un usuario pase un tiempo prolongado tratando de extraer información de un dispositivo. Se debe mostrar solo la información necesaria.

Comprensible – La información presentada puede estar clara para el diseñador pero no necesariamente para los usuarios. Algunos símbolos o abreviaturas pueden ser utilizados

regularmente pero no necesariamente se conoce su significado. Por ejemplo, flechas en dirección vertical hacia arriba puede significar “derecho” o “próximo nivel”.

Legible – Los dispositivos de información deben ser cómodamente legibles a la distancia que el usuario los divise. El Manual de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito (MUTCD, por sus siglas en inglés) recomienda 30 pies de legibilidad por cada pulgada de altura de un rótulo.

Localización – Se deben tomar en consideración las diferentes formas de llegar a un lugar para la ubicación de rótulos. Los rótulos deben ser vistos desde cualquier entrada o centro de información con el mínimo esfuerzo y sin la necesidad de caminar una larga distancia. Deben ser ubicados en puntos de decisión durante el recorrido del terminal. Los dispositivos de información de vuelos deben ser ubicados en lugares donde no se obstruya el flujo de pasajeros, visitantes o personal del aeropuerto.

A cada característica se le asigna un punto para obtener el total de cinco puntos con los que se evalúa cada factor. La evaluación se lleva a cabo verificando que el terminal cumpla con las características evaluadas. Los puntos deben asignarse en incrementos de 0.5 puntos. Esto significa que cada factor puede obtener 0, 0.5 o 1.0 puntos, dependiendo del número de faltas encontradas o la severidad de la falta.

5.2.2.2 Espacio para fila y flujo de pasajeros

El espacio disponible para permitir el flujo cómodo y sin obstrucciones a los pasajeros en los pasillos principales y acomodar las filas de abordaje del avión es evaluado mediante el contraste de estas con las dimensiones recomendadas por la ACRP (2010). En la Figura 5.7 se muestran ejemplos de obstrucciones comunes en pasillos de aeropuertos y cómo se ve afectado el ancho efectivo del pasillo. Esta figura demuestra que es necesario tomar en consideración las funciones que se llevan a cabo a ambos lados del pasillo para determinar el ancho efectivo y por consiguiente el nivel de servicio brindado.

El ancho de los pasillos principales de un terminal se determina en función de la presencia de salidas a uno o ambos lados del pasillo, pasillos rodantes a lo largo de este, volumen de pasajeros y actividades centrales (ACRP, 2010). La ACRP recomienda un pasillo principal de 20 pies de ancho para terminales que no contengan pasillos rodantes y que sólo muestren salidas a un solo lado del pasillo. El ancho de pasillo aumenta a 30 pies para pasillos principales con salidas a ambos lados o pasillos con concesiones a un lado que se comporten como pasillos con

salidas a ambos lados. Esta configuración es adecuada generalmente para terminales de mediano a alto volumen. Terminales con bajo volumen podrían funcionar con pasillos más estrechos. Los terminales con pasillos rodantes deben ofrecer un espacio de 15 pies a ambos lados del pasillo rodante.

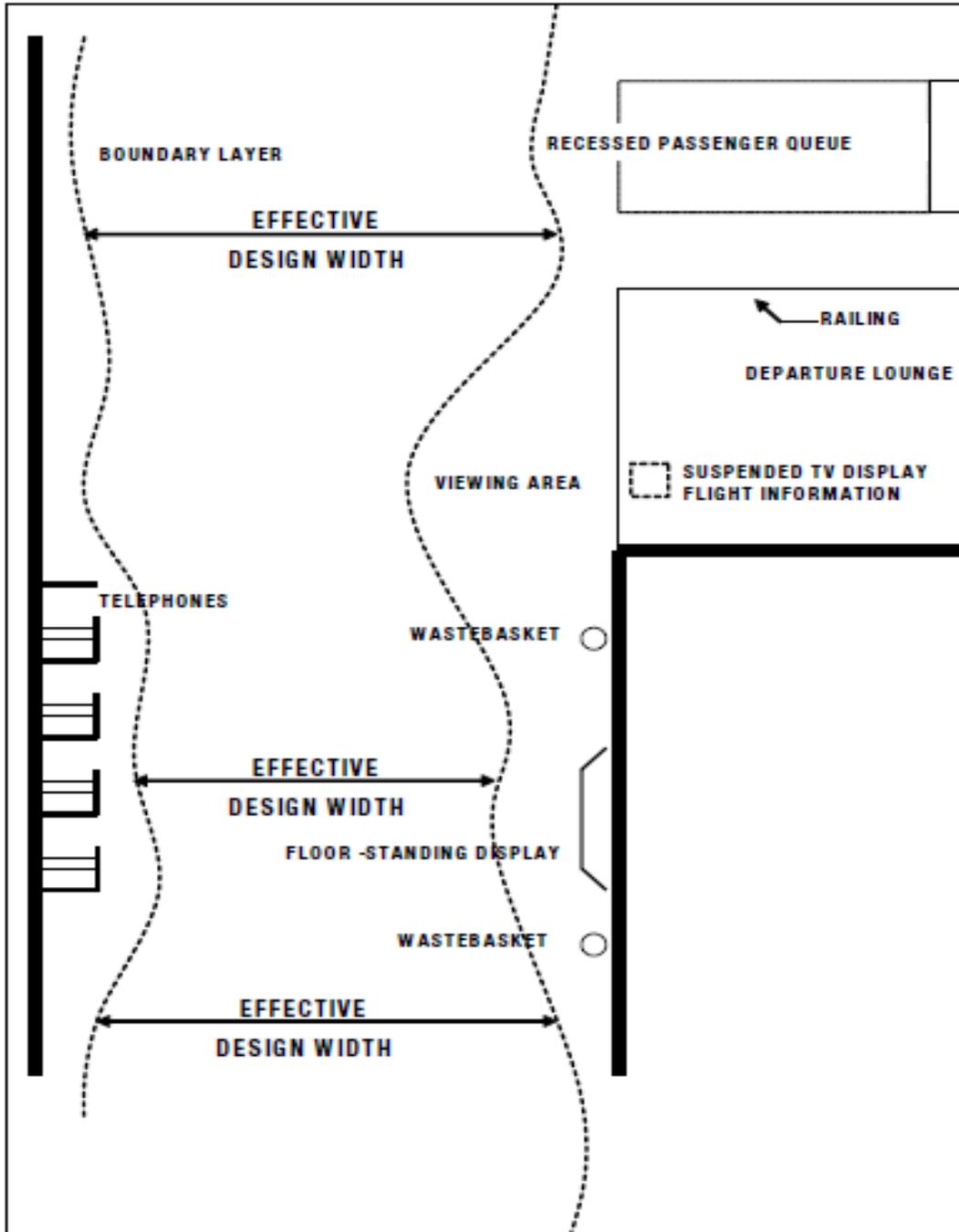


Figura 5.7 Efecto de objetos en el ancho efectivo de un pasillo principal de terminal

Un área funcional importante dentro del área asegurada es el área de espera para abordar. En esta área se debe cumplir con unas dimensiones mínimas para lograr ofrecer el espacio necesario de fila en el evento de abordaje. Las dimensiones funcionales recomendadas para esta área se muestran en la Figura 5.8. Las dimensiones utilizadas para evaluar esta área son el ancho necesario del pasillo de circulación (20 pies, mínimo), ancho de pasillo de abordaje (6 pies, mínimo), profundidad del área de espera (25 pies, mínimo) y la profundidad del podio en el área de espera (15 pies).

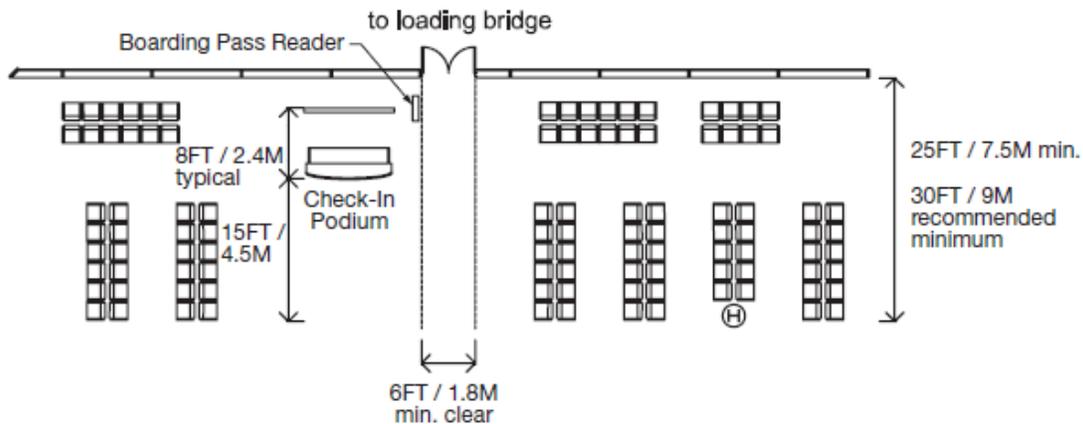


Figura 5.8 Dimensiones recomendadas para configuración de salidas de terminales en aeropuertos (ACRP, 2010)

Las medidas tomadas en el terminal evaluado deben ser iguales o mayores a las mínimas recomendadas de lo contrario se pierden los puntos asignados a estas dimensiones. En este caso se dividen los cinco puntos de la evaluación entre las cuatro dimensiones evaluadas (ancho de pasillo de circulación, ancho de pasillo de abordaje, profundidad de área de espera y área de espera para abordar) lo cual resulta en un total de 1.25 puntos por cada dimensión evaluada.

5.2.2.3 Número de asientos y área disponibles por salida

El número de asientos y área de espera para abordar, del cual debe disponer una salida en un terminal, depende del número de pasajeros que pueda acomodar el avión de mayor capacidad que utilice regularmente la salida (Vásquez et al., 2011). Es necesario que cada salida disponga de asientos para los pasajeros, aunque no es necesario ofrecer asientos para todos los pasajeros. Según las guías de diseño de la ACRP, el nivel de servicio percibido depende del número de asientos y el espacio por pasajero que se ofrece en una salida. En la Tabla 5.12 se muestran el nivel de servicio y la puntuación asignada al número de asientos disponibles y área por pasajero en el área de espera para abordar del terminal de un aeropuerto. La escala de por ciento de

asientos disponibles en la salida de un terminal fue desarrollada en base a recomendaciones de la ACRP (2010) mientras que el nivel de servicio del área disponible por pasajero es una escala desarrollada por la IATA.

Tabla 5.12 Nivel de servicio para número de asientos y área de espera disponible por salida

Número de asientos (Avión de mayor capacidad)	Área por pasajero (ft ² /pasajero) (IATA)	Nivel de Servicio	Puntos
≥90%	≥15	A	5
<90% pero ≥80%	>15 pero ≤12.9	B	4
<80% pero ≥70%	>12.9 pero ≤10.8	C	3
<70% pero ≥60%	>10.8 pero ≤8.6	D	2
<60% pero ≥50%	>8.6 pero ≤10.5	E	1
<50%	<10.5	F	0

5.3 Zona Aérea

La zona aérea de un aeropuerto se compone de varios elementos. El funcionamiento de estos elementos en conjunto determina la capacidad de esta zona. Las características de la zona aérea y su capacidad predominan sobre las demás zonas debido a que en esta zona se llevan a cabo las funciones principales de un aeropuerto. Además que la capacidad de la zona aérea es el factor limitante en un aeropuerto.

La evaluación de la zona aérea se divide en las categorías de configuración y geometría del aeropuerto, tiempos de ocupación y elementos adicionales. Para evaluar cada una de estas categorías se toman en consideración diferentes factores o elementos mencionados en la revisión de literatura (capítulo 2) e incorporados en el modelo de evaluación desarrollado.

5.3.1 Configuración y Geometría del Aeropuerto

En la evaluación de la configuración y geometría de un aeropuerto se toma en consideración el número, orientación y geometría de pista, salidas y calles de rodaje, así como la localización del edificio terminal y las áreas de seguridad y almacenamiento requeridas. La relación de estos elementos con la capacidad de un aeropuerto se definen de la siguiente forma (ACRP, 2012):

Pistas - El número de pistas y de la forma en que estas son operadas pueden tener un efecto sustancial en la capacidad de un aeropuerto. La posibilidad de operación (aterrizaje o despegue) de un tipo particular de aeroplano en una pista se determina en base a la longitud, ancho, resistencia del pavimento, y orientación de la pista. La pista debe ser lo suficientemente larga para que una aeronave pueda acelerar a la velocidad de despegue o detenerse lo suficiente para salir de la pista. La pista de aterrizaje debe ser lo

suficientemente ancha para acomodar la anchura del tren de aterrizaje y proporcionar espacio suficiente entre el cuerpo de la nave y edificios o aviones adyacentes. Las pistas están orientadas generalmente en la dirección de los vientos dominantes; los aviones operan mejor con el viento en contra, y la mayoría de las aeronaves tienen una capacidad limitada para volar con vientos cruzados fuertes o vientos de cola. El pavimento debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar la aeronave de diseño (es decir, la aeronave que opere regularmente en el aeropuerto) y sin daños estructurales en la aeronave o el pavimento.

Calles de rodaje – Las calles de rodaje se pueden utilizar para almacenar temporalmente los aviones esperando para despegar o en espera de una puerta, aunque lo mejor es mantener la aeronave en espera en plataforma. El número, la ubicación y diseño de las calles de rodaje pueden afectar significativamente la capacidad de aeropuerto. Estas proporcionan salidas de pista que los aviones puedan llegar a la pista a realizar un despegue o despejar la pista luego del aterrizaje. La combinación de pistas y calles de rodaje se conoce generalmente como el área de movimiento.

Áreas de almacenamiento temporero – Estas áreas tienen por objeto proporcionar un área de espera fuera del sistema de calles de rodaje para las aeronaves que deben esperar hasta estar listo para despegar o hasta que una puerta esté disponible. Se proveen primordialmente en aeropuertos de alta demanda para evitar la demora de otros vuelos. La falta de un área de almacenamiento cuando es necesaria afecta directamente la capacidad de la pista por el contratiempo de hacer esperar a vuelos que estén listos para despegar o tengan disponible una puerta para estacionar.

Plataforma - Las plataformas son generalmente áreas utilizadas para el aparcamiento de las aeronaves para carga de combustible, mantenimiento y/o embarque o desembarque de pasajeros o carga. Proveer un área de plataforma menor a la necesaria o un tiempo de ocupación de plataforma mayor al necesario para número de aterrizajes del aeropuerto puede restringir la capacidad de un aeropuerto.

Tabla 5.13 Modelo de evaluación para la configuración y geometría de la zona aérea

Área de Evaluación	Peso por relevancia con la operación de un aeropuerto			
	Zona	Categoría	Factor	Puntos
	Peso	Peso	Peso	(0-5)
3.1 Configuración y Geometría		40%	100%	
a) Capacidad de pistas			35%	
b) Geometría de pistas			15%	
c) Configuración y geometría de salidas de pista			20%	
d) Configuración y geometría de calles de rodaje			15%	
e) Áreas de almacenamiento temporero			15%	

La Tabla 5.13 muestra los factores incluidos en esta categoría y su peso porcentual en el modelo de evaluación desarrollado. La capacidad de pista se considera de mayor importancia que los demás factores debido a su relación directa con las demoras que se generan en aeropuertos. Es debido a esta razón que el peso asignado a este factor es el mayor entre los seis factores incluidos en la configuración y geometría del aeropuerto (35%). La ubicación y geometría de las salidas de una pista (factor c) determinan el tiempo de ocupación de los aviones que utilizan la misma y a raíz de este tiempo de ocupación puede limitar la capacidad de la zona aérea de un aeropuerto. Este factor lleva un peso porcentual menor al asignado a la capacidad de pistas pero mayor a los demás factores (20%).

Los restantes factores de esta categoría tienen asignados un peso de 15% cada uno. La geometría de pista establece el avión de mayor envergadura (longitud de alas) que puede manejar el aeropuerto mientras que las áreas de almacenamiento temporero evitan demoras generadas al no contar con estos espacios. Finalmente, las calles de rodaje pueden limitar la capacidad de la zona aérea al tener que cruzar una pista activa. Se evalúan cada uno de los factores mediante el procedimiento descrito en las próximas secciones de este documento.

5.3.1.1 Capacidad de pistas

El número y configuración de pistas recomendado para un aeropuerto depende del volumen de tráfico aéreo esperado en un periodo determinado de tiempo. La Tabla 5.14 muestra la capacidad (operaciones por hora) para las configuraciones más comunes de pistas para condiciones de regla de vuelo visual (VFR, por sus siglas en inglés) y de regla de vuelo por instrumentos (IFR, por sus siglas en inglés). El número de operaciones por hora que puede manejar un aeropuerto también depende de los demás factores mencionados anteriormente y por esta razón se muestra un intervalo de posibles valores para capacidad en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 capacidad de pistas según su configuración (Vázquez et. al., 2011)

Configuración	Capacidad (operaciones por hora)	
	Condición VFR	Condición IFR
Sencilla	50-100	50-70
Paralela	60-200*	50-125**
Doble-carril	70% mayor a una pista sencilla	60% mayor a una pista sencilla
V-Abierta	60-180 (en dirección contraria a la V) 50-100 (en dirección a la V)	50-80 (en dirección contraria a la V) 50-60 (en dirección a la V)
* Por un par de pistas paralelas, dependiendo del proceso de llegadas y salidas.		
** Por un par de pistas paralelas, dependiendo del espaciamiento entre las pistas.		

En la práctica, se utilizan comúnmente dos definiciones de capacidad de la zona aérea de un aeropuerto: capacidad de rendimiento y capacidad práctica. La capacidad de rendimiento, mejor conocida como *throughput capacity* en inglés, es la medida del número máximo de operaciones de aviones que puede manejar la zona aérea de un aeropuerto o un componente de la misma. La capacidad práctica o volumen de servicio se define como el número de operaciones de aeronaves que resulta en una demora promedio máxima específica. La capacidad de rendimiento contesta la pregunta: ¿Cuántas operaciones de aeronaves puede la zona aérea de un aeropuerto acomodar razonablemente en un período determinado de tiempo cuando hay una demanda continua de servicio durante ese período?; mientras que la capacidad práctica responde a la pregunta: ¿Cuántas aeronaves puede acomodar la zona aérea de un aeropuerto a cierto nivel de confianza?

La capacidad de pista debe ser evaluada comparando este valor con la demanda manejada a la hora pico de operación. El informe 79 de la ACRP (2012) define cinco niveles utilizados en la actualidad para determinar la capacidad de la zona aérea de un aeropuerto:

Nivel 1: Utilización de tablas – En este nivel de modelación se realiza un análisis de capacidad de un aeropuerto utilizando tablas como referencia. Se utiliza la configuración de pista del aeropuerto junto con otras características como la mezcla de flota que regularmente utiliza el aeropuerto para determinar la capacidad horaria y el volumen de servicio anual (ASV, por sus siglas en inglés) en condiciones meteorológicas de vuelo visual (VMC, por sus siglas en inglés) y condiciones meteorológicas de vuelo por instrumentación (IMC, por sus siglas en inglés). La Figura 5.9 muestra dos de las 19 configuraciones que permite analizar este método. En esta tabla se escoge la configuración e índice de mezcla de aviones en la flota que mejor se ajuste al

aeropuerto seleccionado. Mediante estos datos se obtiene la capacidad por hora del aeropuerto para las condiciones de VFR e IFR y la ASV correspondiente.

NO.	Runway-use Configuration	Mix Index *(C+3D)	Hourly Capacity Ops/Hr		Annual Service Volume Ops/Yr
			VFR	IFR	
1.		0 to 20	98	59	230,000
		21 to 50	74	57	195,000
		51 to 80	63	56	205,000
		81 to 120	55	53	210,000
		121 to 130	51	50	240,000
2.		0 to 20	197	59	355,000
		21 to 50	145	57	275,000
		51 to 80	121	56	260,000
		81 to 120	105	53	285,000
		121 to 180	94	60	340,000

Figura 5.9 Ejemplo de las configuraciones disponibles en el Nivel 1 del análisis de capacidad (FAA, 1983)

Nivel 2: Gráficas, Nomogramas y Hojas de cálculo – Se realiza un análisis de capacidad para un mayor rango de configuraciones de pista y alternativas de operación por medio del uso de gráficas y homógrafos. Este nivel brinda al usuario flexibilidad adicional en la especificación de las condiciones de operación del aeropuerto. Este método requiere la selección de la mejor representación de techo, visibilidad y la selección de la configuración de pista que más se ajuste de un diagrama de varias configuraciones de uso de pista. El usuario debe encontrar las gráficas y nomogramas correspondientes para el caso seleccionado. La Figura 5.10 muestra la gráfica y homógrafo para un aeropuerto en particular.

Nivel 3: Modelos analíticos de capacidad – Este nivel de modelación analiza la capacidad de un aeropuerto mediante la generación de modelos analíticos de computadora. Algunos ejemplos son el FAA *Analytical Capacity Model* (ACM) y el LMI *Runway Capacity Model*. La Figura 5.11 muestra un ejemplo en la pantalla del modelo ACM. Este nivel de modelación permite variar una cantidad significativa de factores para lograr obtener una mejor precisión en la determinación de la capacidad por hora del aeropuerto evaluado.

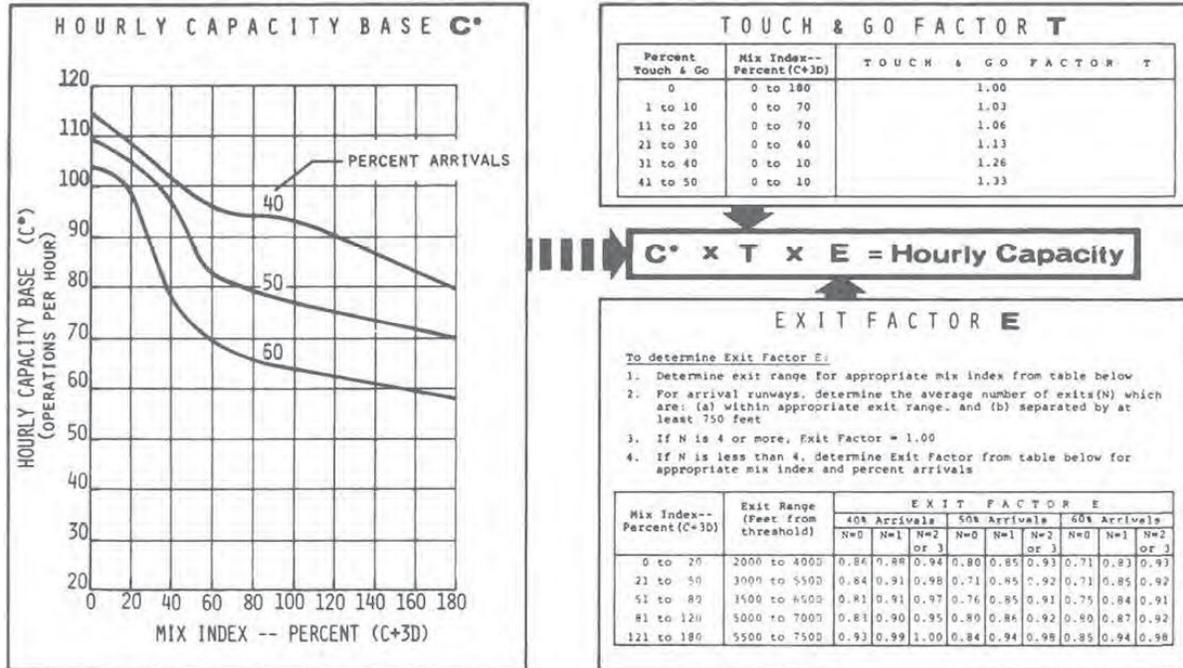


Figura 5.10 Gráfica y homógrafo para el análisis de capacidad de un aeropuerto en particular (FAA, 1983)

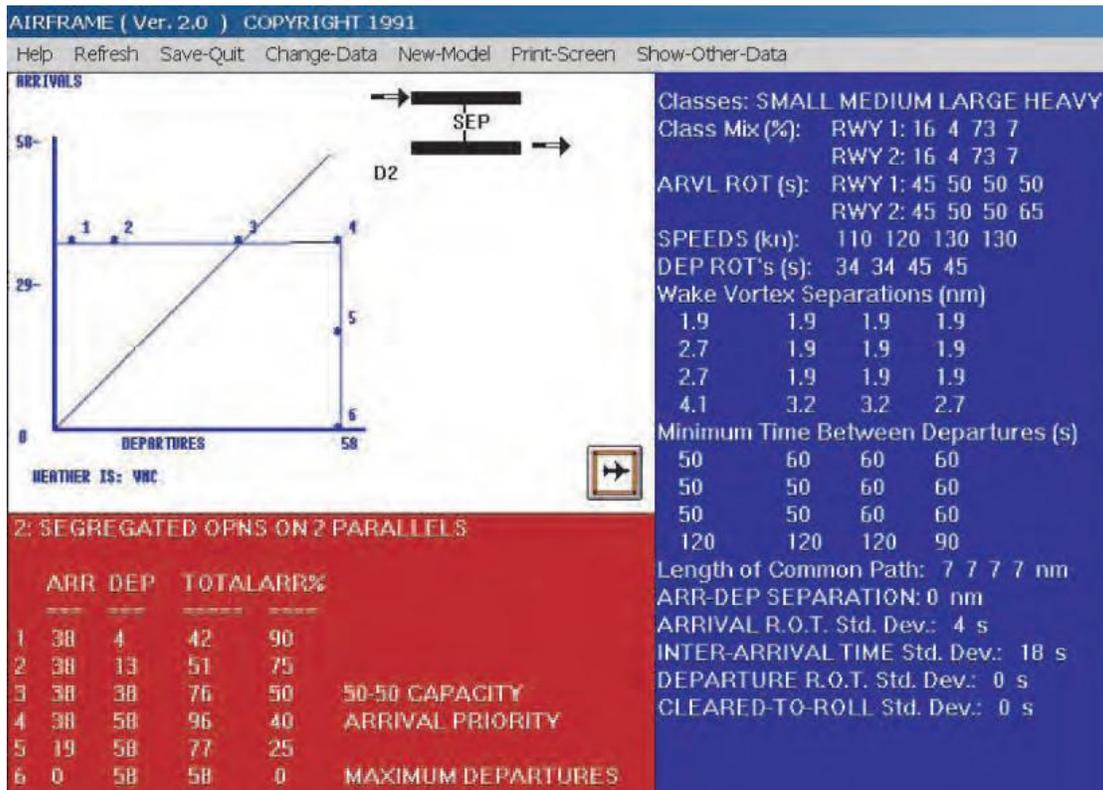


Figura 5.11 Pantalla de modelo ACM para análisis de capacidad de aeropuertos (ACRP, 2012)

Nivel 4: Modelos de simulación de capacidad de vuelos – Este nivel de modelación es un punto intermedio entre el nivel 3, representado por ACM, y el nivel 5 de modelos de simulación de demoras de vuelos. Ejemplos de estos modelos son SIMMOD y TAAM entre otros. Estos modelos permiten evaluar configuraciones de pista complejas con procedimientos de control de tráfico aéreo específicos y potenciales limitaciones físicas y ambientales.

Nivel 5: Modelos de simulación de demora de vuelos – Los modelos de simulación de demora de vuelos representan el nivel más alto de modelación para evaluar la capacidad del aeropuerto y medir la demora de vuelos en un mismo modelo. En este nivel son pocas las asunciones que se toman, si alguna, ya que la cantidad de datos que requieren los modelos es de un alto nivel de detalle. Los modelos de simulación de nivel 5 permiten analizar situaciones complejas que envuelvan aspectos operativos de la zona aérea y el análisis de la interacción entre los distintos componentes de esta zona (calles de rodaje, plataforma, espacio aéreo). Los modelos requieren el itinerario de vuelos como parte de los insumos. Sin embargo, el nivel de detalle requerido por estos modelos los hace más difíciles y consumir más tiempo en la recolección de datos y calibración del modelo. El costo de la construcción de estos modelos de simulación se estima por encima de los \$100,000.

Los primeros 3 niveles son modelos desarrollados por la FAA e incorporados en su publicación *Airport Capacity and Delay* del año 1983. Los niveles 4 y 5 se desarrollaron luego de varios años, utilizando los avances en tecnología y accesibilidad de los recursos. El nivel que se debe utilizar depende del propósito para realizar un análisis de capacidad. El nivel utilizado también puede variar dependiendo de los datos disponibles.

El propósito de determinar la capacidad para el aeropuerto evaluado es comparar este valor con la demanda actual del aeropuerto. Para este fin es suficiente utilizar el nivel 1 ó 2 de los modelos de análisis de capacidad. Estos modelos brindan como resultado la capacidad y el ASV del aeropuerto.

Para determinar la capacidad de un aeropuerto mediante el nivel 1 es necesario conocer la configuración de pista del aeropuerto y el índice de mezcla de flota para la hora de mayor demanda. El nivel 2 requiere conocer los mismos datos del nivel 1 y adicionalmente el porcentaje de llegadas y el porcentaje de operaciones toque y fuera (*touch and go*) que muestra el aeropuerto en la hora pico para las condiciones de VFR e IFR. Además, en este nivel se toma en consideración el número y ubicación de las salidas de pista del aeropuerto.

La composición de flota de un aeropuerto se divide en cuatro categorías, según las normas de diseño de la FAA, de acuerdo al peso de la nave. Estas categorías se muestran en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15 Composición de flota (ACRP, 2010)

Categoría	Peso (libras)
S	< 12,500 (motor sencillo)
T	< 12,500 (doble motor)
L	12,500 - 300,000
H	> 300,000

Los aviones de un solo motor con peso menor de 12,500 lbs pertenecen a la categoría S, mientras que los aviones de dos motores con peso menor de 12,500 lbs son de categoría T. Estas dos categorías (S y T) abarcan la mayoría de las naves de aviación general y muchas de las avionetas o jets pequeños de pasajeros de aerolíneas regionales. La categoría L incluye aviones comerciales pequeños y jets de carga, aviones de pasajeros medianos y grandes, jets de aviación general más sofisticados y muchos de los aviones militares. La categoría H recoge las aeronaves comerciales y de carga de mayor envergadura, además de los aviones militares más pesados.

El índice de flota se calcula determinando el porcentaje de flota en las categorías L y H que maneja el aeropuerto en la hora pico de demanda. La ecuación 5.2 muestra el cálculo necesario para determinar el índice de flota.

$$Indice\ de\ Mezcla = L + 3H \quad (5.2)$$

donde,

- Índice de mezcla = Indicativo de mezcla de flota de aviones,
- C = Porcentaje de flota de categoría L a la hora pico, y
- D = Porcentaje de flota de categoría H a la hora pico

En la Figura 5.12 se muestra una gráfica de donde se obtiene la demora promedio por aeronave en base a la razón de demanda anual del volumen de servicio anual (ASV).

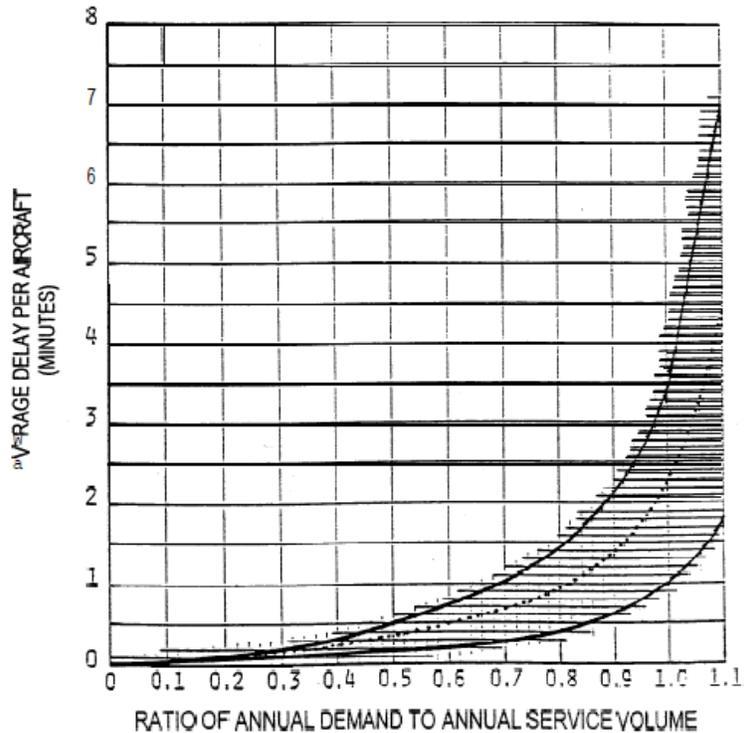


Figura 5.12 Estimado de demora promedio por avión (FAA, 1983)

La razón de demanda del aeropuerto se evalúa utilizando la escala de nivel de servicio desarrollada (Tabla 5.16). Según datos revelados por la agencia Aerolíneas por América (A4A, por sus siglas en inglés), en el 2012, se estima un costo directo a las aerolíneas de \$78.17 por minuto de demora en vuelos. Este valor considera el combustible y mantenimiento del avión y costos por tripulación entre otros. Se estima un total de \$7,175 millones en pérdidas a las aerolíneas por razón de demoras. Este valor no incluye un costo a los pasajeros, estimado en \$39.74 por hora de retraso.

La Tabla 5.16 muestra la escala desarrollada para evaluar la razón de demanda obtenida para el aeropuerto evaluado. Se toma en consideración el tiempo de demoras en minutos por la razón de demanda determinada para asignar un nivel de servicio a este factor. En esta tabla se utiliza una demora de cuatro a seis minutos para determinar la capacidad de un aeropuerto. Se asume que una demora en este rango se debe a una demanda cercana la capacidad y por lo general el aeropuerto se considera congestionado.

Tabla 5.16 Nivel de servicio y puntuación para la razón de demanda determinada

Razón de demanda	Nivel de Servicio	Puntuación
≤ 0.6	A	5
>0.6 pero ≤ 0.7	B	4
>0.7 pero ≤ 0.8	C	3
>0.8 pero ≤ 0.9	D	2
>0.9 pero ≤ 1	E	1
>1	F	0

5.3.1.2 Geometría de pistas

La geometría de pistas de un aeropuerto depende de su código de referencia (ARC, por sus siglas en inglés). El ARC define la longitud máxima de alas (Tabla 5.17) y la velocidad máxima de aproximación (Tabla 5.18) del avión de mayor envergadura que puede utilizar el aeropuerto. Estas dos características se utilizan para evaluar las pistas de un aeropuerto en este modelo. El ancho de una pista varía comúnmente entre 150 y 200 pies para poder manejar aviones de gran tamaño.

Tabla 5.17 Clasificación de aeropuertos según la longitud máxima de alas de avión típico (PRPA, 1995)

Grupo para Aeroplano de Diseño de FAA	Máxima Longitud de Alas		Avión Típico
	Pies	Metros	
I. Regional Pequeño	49	15	Metro
II. Regional Mediano	79	24	SF340/CRJ
III. Cuerpo Corto/ Regional Grande	118	36	A320/B737/DHC18/E175
IIIa. B757	135	41	B757
IV. Cuerpo extenso	171	52	B767/MD11
V. Jumbo	214	65	B747,777,787/A330,340
VI. Super Jumbo	262	80	A380/B747-8

Tabla 5.18 Categoría del aeropuerto según la velocidad de aproximación de las aeronaves (FAA, 2012)

Categoría	Velocidad de Aproximación
A	Menos de 91 nudos
B	91 nudos o más, pero menos de 121 nudos
C	121 nudos o más, pero menos de 141 nudos
D	141 nudos o más, pero menos de 166 nudos
E	166 nudos o más

Se debe determinar el avión de mayor envergadura que utiliza el aeropuerto evaluado regularmente (500 operaciones anuales o más). Los requerimientos de largo de pista para despegue y aterrizaje, ancho de alas y velocidad de aproximación de este avión deben ser

evaluados en relación al largo y ancho de pista provisto y la velocidad de aproximación máxima posible en el aeropuerto. En total se evalúan cuatro características del avión típico que utiliza la pista para determinar el cumplimiento de la pista con los requerimientos de este avión:

- largo de alas del avión típico,
- velocidad de aproximación del avión típico,
- largo de pista requerido para el aterrizaje del avión típico, y
- largo de pista requerido para el despegue del avión típico.

Cada una de estas características se evalúa de un total de 1.25 puntos. Los puntos se otorgan a los factores que cumplan con el mínimo requerido, de lo contrario se penalizan con la totalidad de los puntos asignados.

5.3.1.3 Configuración y geometría de salidas de pista

Las entradas/salidas de una pista son parte de las calles de rodaje que componen la zona aérea. Debido a su importancia la capacidad de una pista se evalúa de forma independiente en esta sección. El número y geometría de las salidas de una pista es el componente físico que más afecta la capacidad de operación aérea de un aeropuerto, luego de considerar la configuración y orientación de las pistas. La ubicación de estas salidas afecta el tiempo de ocupación de la pista de las naves. Mientras mayor sea el tiempo que un avión permanece en la pista, menor es el tiempo disponible para otros aviones realizar operaciones en esta pista y, por consiguiente, menor es la capacidad de la pista. El modelo de nivel 2 (descrito en la sección 5.2.1.1) desarrollado por la FAA para determinar la capacidad aérea de un aeropuerto penaliza la capacidad de las pistas por el número y la ubicación específica de salidas a lo largo de la pista. La ubicación exacta de las salidas a lo largo de la pista está basada en la composición de la flota de aviones que utiliza el aeropuerto (explicado en la sección 5.2.1.1).

Para evaluar este elemento es necesario determinar el factor asignado al número y ubicación de salidas de pista (E) por el modelo de nivel 2 desarrollado por la FAA para el análisis de capacidad de aeropuertos (FAA, 1983). El factor E se determina en base a la configuración de pista del aeropuerto, al índice de mezcla, el porcentaje de llegadas para las condiciones de VFR e IFR, y el número de salidas a cierto rango de distancia del umbral de la pista. La distancia a la cual deben estar ubicadas las salidas de pista depende del índice de mezcla del aeropuerto. La escala desarrollada, mostrada en la Tabla 5.19, indica la puntuación obtenida por la configuración de salidas de pista del aeropuerto en base a la penalización a la

capacidad de la configuración de pista asignado por el modelo de nivel 2 desarrollado por la FAA.

Tabla 5.19 Puntuación asignada por la configuración de salidas de pista del aeropuerto evaluado

Factor de Salidas (E)	Puntuación
> 0.95	3
≥ 0.85 pero < 0.95	2
≥ 0.75 pero < 0.85	1
< 0.75	0

Los dos puntos restantes en la evaluación de salidas de pista se asignan a la utilización de salidas de alta velocidad en la pista (30 grados con respecto a la pista). Las salidas de alta velocidad permiten que los aviones que la utilizan disminuyan su tiempo de ocupación de pista y por lo tanto incrementa la capacidad de la pista. La puntuación por la utilización de salidas de alta velocidad se distribuye como se muestra en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20 Puntuación asignada a la utilización de salidas de pista de alta velocidad

Número de salidas por pista	Puntuación
2	2
1	1
0	0

5.3.1.4 Configuración y geometría de calles de rodaje

Las calles de rodaje son elementos que permiten el tráfico de aviones a las diferentes componentes de la zona aérea de un aeropuerto (incluyendo la pista). Existen tres clasificaciones importantes de calles de rodaje en aeropuertos (ACRP, 2012):

Calle de rodaje paralela a la pista (completa o parcial) – Esta generalmente provee una ruta a los aviones para llegar a la pista o salir de la misma.

Salidas/entradas de pista – Este elemento conecta la pista con la calle de rodaje paralela o cualquier otra calle de rodaje que provea acceso a la pista ya sea para despegue o aterrizaje (este elemento se evalúa independientemente en la sección 5.2.1.3).

Calles de circulación o acceso – Proveen rutas de accesos a los diferentes componentes de la zona aérea del aeropuerto.

Las calles de rodaje deben diseñarse de manera tal que proporcionen separaciones adecuadas entre los aviones. Se deben minimizar los puntos de intersección entre calles de rodaje

para evitar puntos de conflicto para el tráfico de aviones. Las calles de rodaje deben ser ubicadas con el fin de evitar el cruce de pistas activas de no ser completamente necesario. La geometría de las calles de rodaje debe permitir maniobras a alta velocidad con el propósito principal de reducir el tiempo de ocupación de la pista de aviones que han aterrizado y permitir acceso más rápido a la pista a aviones que se dirigen a despegar.

En la evaluación de las calles de rodaje se debe identificar la presencia de una calle de rodaje paralela a la pista y en qué medida cubre la pista (completa o parcial). Las calles de rodaje que crucen una pista activa disminuye la capacidad de la pista por lo que esta configuración es penalizada en esta evaluación. Además, se debe evaluar el cumplimiento de las dimensiones de las calles de rodaje con las dimensiones mínimas requeridas para el tráfico del avión típico de mayor envergadura del aeropuerto. Entre las dimensiones más importantes se encuentra el ancho, radios de giro (90°, 135°, 150°, 180°, 360°) necesarios para realizar las distintas maniobras. Se asignan dos puntos a la evaluación de la calle de rodaje paralela a la pista ya que este es uno de los elementos de la zona aérea que más afecta el tiempo de ocupación de pista de los aviones. La intersección de calles de rodaje con pistas activas se evalúa con dos puntos ya que esta configuración ocasiona demoras adicionales en aeropuertos que la utilicen. El punto restante en la evaluación se utiliza para evaluar las dimensiones requeridas por el avión típico de mayor envergadura que utiliza el aeropuerto. En las Tablas 5.21, 5.22 y 5.23 se muestran las puntuaciones asignadas a cada una de estas métricas.

Tabla 5.21 Puntuación asignada la evaluación de la calle de rodaje paralela a la pista

Calle de Rodaje Paralela	Puntuación
Completa	2
Parcial	1
No posee	0

Tabla 5.22 Puntuación asignada la evaluación de dimensiones requeridas de calles de rodaje por avión típico de mayor envergadura y la inclusión de giros de alta velocidad

Dimensión de Calles de Rodaje	Puntuación
Cumple	1
No cumple con alguna de ellas	0

Tabla 5.23 Puntuación asignada a la evaluación de calles de rodaje que atraviesan una pista activa

Calle de Rodaje	Puntuación
No cruza una pista activa	2
Cruza un pista activa aunque no limita su capacidad	1
Cruza un pista activa y limita su capacidad	0

Para determinar si una calle de rodaje que cruza una pista activa afecta la capacidad de la pista se debe llevar a cabo el procedimiento descrito en el Capítulo 2 del informe AC-150/5060-5 (FAA, 1983). Para realizar este cálculo es necesario conocer las operaciones que se llevan a cabo en la pista, la distancia de la intersección a lo largo de la pista, la demanda de la hora pico de la pista y el índice de mezcla del aeropuerto. Utilizando las tablas creadas por la FAA para este propósito, se debe determinar si la capacidad de operaciones de la calle de rodaje que cruza la pista es mayor a la capacidad de operación de la pista. Este resultado permite utilizar la Tabla 5.23 para la evaluación de este elemento.

5.3.1.5 Áreas de almacenamiento temporero

La FAA requiere disponer de áreas de preparación para entrar a la pista y recomienda crear áreas de almacenamiento temporal en los aeropuertos que lo requieran. Las áreas de almacenamiento temporero (*holding bays*) son áreas de espera, fuera de las calles de rodaje, para aviones que no puedan despegar por alguna u otra razón o aviones en espera de una puerta de desembarque luego de aterrizar. Las calles de rodaje también pueden servir de áreas de almacenamiento en los casos donde estas áreas permiten el tráfico de aviones mientras tienen aviones en espera. Estas áreas deben ser capaces de acomodar de dos a cuatro naves de la mayor envergadura que utilicen el aeropuerto. Mientras mayor sea la cantidad de aviones aterrizando en relación a la cantidad de puertas de desembarque disponibles, mayor será el área necesaria para acomodar las naves que tengan que esperar por la disponibilidad de una puerta.

Para evaluar este factor es necesario identificar si el aeropuerto evaluado muestra congestión aérea a la hora pico de despegues o aterrizajes para determinar la necesidad del uso de áreas de almacenamiento temporero. De concluirse que no es necesario un área de almacenamiento temporero se debe evaluar este factor asignándole la totalidad de los puntos asignados a la evaluación, de lo contrario, se debe usar la Tabla 5.24 para determinar los puntos que obtiene el aeropuerto en la evaluación de este elemento. En las evaluaciones en donde se provee un rango de puntuación es necesario tomar en consideración en qué medida se ve afectada la operación por la falta incurrida para escoger una de ambas puntuaciones.

Las puntuaciones son asignadas penalizan el aeropuerto según la gravedad de la falta en la que incurre. La escala evalúa la disponibilidad de áreas de almacenamiento cuando sea necesario, además de evaluar en las operaciones donde está disponible y la capacidad de almacenaje. La disponibilidad de áreas de almacenamiento de aviones, donde sea necesario, es el punto más crítico por lo que se muestra una penalidad mayor para los aeropuertos que no tengan disponible las áreas de almacenamiento necesarias. La capacidad recomendada para estas áreas es evaluada aunque la penalidad por no cumplir con este requisito es menor que la disponibilidad del área de almacenamiento.

Tabla 5.24 Puntuación asignada a la evaluación del área de almacenamiento temporero

Área de almacenamiento Temporero	Puntuación
No es necesario	5
Disponible en operaciones donde es necesario (permite almacenar 2 aviones típicos o más)*	5
Disponible en operaciones donde es necesario (permite almacenar solo 1 avión típico)*	4
Disponible aunque no en todas las operaciones donde es necesario (permite almacenar 2 aviones típicos o más)*	3-2
Disponible aunque no en todas las operaciones donde es necesario (permite almacenar solo 1 avión típico)*	2-1
Es necesario y no se tiene disponible	0

*Avión típico – Aeronave de mayor envergadura que visita regularmente el aeropuerto

5.3.2 *Tiempos de Ocupación*

En esta sección se describe la metodología desarrollada para la evaluación de los tiempos de ocupación de la zona aérea de un aeropuerto. Los tiempos de ocupación de diferentes elementos de la zona aérea pueden ser causantes de demoras generadas en los viajes o dar indicios de posible deficiencia en infraestructura y/u operación. Entre los procesos evaluados se encuentra el tiempo de ocupación de pista, tiempo de ocupación de calles de rodaje y el tiempo de ocupación de plataforma de las aeronaves. La Tabla 5.25 muestra el modelo de evaluación de esta categoría.

Tabla 5.25 Modelo de evaluación para los tiempos de ocupación de la zona aérea

Área de Evaluación	Peso por relevancia a la Infraestructura y Operación de un aeropuerto			
	Zona	Categoría	Factor	Puntos
	Peso	Peso	Peso	(0-5)
3.2 Tiempos de ocupación		40%	100%	
b) Tiempo de ocupación de pista			40%	
c) Tiempo de ocupación de calles de rodaje			30%	
d) Tiempo de ocupación de plataforma			30%	

La capacidad de una pista está regida por el tiempo de ocupación de la pista, tiempo de transferencia desde y hacia las pistas (30%) y tiempo en plataforma de los aviones (30%) (Vásquez et al., 2011). El tiempo de mayor relevancia es el tiempo en pista ya que afecta directamente la capacidad de estas y por esta razón se le asigna el mayor peso en el modelo (40%). Por otro lado, aunque las calles de rodaje son el elemento más flexible en la zona aérea a la hora de permitir el movimiento simultáneo de aviones, este contiene un peso significativo en el modelo por la probabilidad de que este factor limite la capacidad de las pistas al ser necesario atravesar una pista activa en los procesos de despegue o aterrizaje (30%). El tiempo en plataforma es un indicador de la eficiencia operativa de la zona aérea. Un tiempo de aviones en plataforma excesivo afecta la capacidad del aeropuerto y genera demoras en los vuelos (30%).

5.3.2.1 Tiempo de ocupación de pista

El tiempo de ocupación de pista es uno de los factores influyentes en la determinación de la capacidad de una pista, como podemos apreciar en el modelo de nivel 2 desarrollado por la FAA (1983) y descrito en la sección 5.2.1.4. El tiempo de ocupación de una pista es reflejo de la configuración y geometría de salidas a lo largo de esta. La configuración y geometría de las salidas de una pista fueron evaluadas anteriormente (sección 5.2.1.4) pero es necesario determinar mediante datos reales el tiempo de ocupación de pista para analizar la operación desde un punto de vista funcional y no de infraestructura.

La FAA (1984) realizó un estudio en el que se tomó una muestra significativa de datos de tiempo de ocupación de pista para las operaciones de despegue y aterrizaje en tres aeropuertos de alta demanda en Estados Unidos. Estos aeropuertos fueron La Guardia (Nueva York), Boston International y Newark (Nueva Jersey).

Los datos de tiempo de ocupación de pista en el proceso de aterrizaje se registraron desde el momento en que el aeroplano cruza el umbral de la pista hasta que despeja la pista utilizando una salida. Para el proceso de despegue se registra el tiempo de ocupación de pista desde el

momento en que el avión entra a la pista hasta que este sale del área de la pista. El promedio de ocupación de pista de los tres aeropuertos fue de 46 segundos. Este promedio incorpora ambas operaciones, despegues y aterrizajes, ya que no se encontró diferencia significativa entre los tiempos de ocupación de ambas medidas. Además de esto, tampoco se encontró diferencia significativa entre los datos tomados en las condiciones de pista seca y pista húmeda por lo que no se hace diferencia entre estas características.

Por otra parte, la ACRP (2012) indica que los tiempos de ocupación típicos varían entre 40 y 60 segundos en despegue y entre 35 y 45 segundos en aterrizajes. Se define el tiempo de ocupación para aterrizajes como el tiempo medido desde que el avión cruza el umbral de la pista hasta que se encuentra fuera del área de seguridad de la pista (RSA, por sus siglas en inglés). Para despegues el tiempo de ocupación se define como el tiempo desde que el avión se mueve dentro de RSA hacia la pista hasta que despeje la pista.

Se desarrolla una escala de evaluación de tiempo promedio de ocupación en pista en base a los datos obtenidos de las dos investigaciones mencionadas (Tabla 5.26). Para esto se asume que no hay diferencia significativa entre el tiempo de ocupación de pistas entre las operaciones de despegue y aterrizaje. En la Tabla 5.26 también se indica la puntuación asignada a cada intervalo promedio de ocupación de pista obtenido.

Tabla 5.26 Escala de evaluación de tiempo de ocupación de pista

Tiempo de ocupación de pista (seg)	Nivel de servicio	Puntuación
≤ 40	A	5
> 40 pero ≤ 45	B	4
> 45 pero ≤ 55	C	3
> 55 pero ≤ 65	D	2
> 65 pero ≤ 70	E	1
> 70	F	0

5.3.2.2 Tiempo de ocupación de calles de rodaje

El tiempo de ocupación de calles de rodaje puede ser un factor limitante de la capacidad de la zona aérea de un aeropuerto si es necesario atravesar una pista activa en la utilización de estas. Sin embargo, en aeropuertos donde las calles de rodaje no atraviesan una pista activa, es el elemento con mayor capacidad en la zona aérea ya que permite el tráfico constante y simultáneo de aviones. Es por estas razones que este factor sólo se debe incluir en la evaluación cuando se evalúen calles de rodaje que deban cruzar una pista activa. De lo contrario, este factor no debe ser evaluado y se debe calificar los restantes factores en base a la suma de sus respectivos pesos.

En este caso se evalúan el tiempo de ocupación de pistas y tiempo de ocupación de plataforma en base a 70% (suma de 40% y 30%) en vez de 100%.

En el caso de que el aeropuerto muestre una configuración de calles de rodaje en las que es necesario atravesar una pista activa, será necesario utilizar el procedimiento descrito a continuación para evaluar el efecto de esta configuración en el tiempo de ocupación de calles de rodaje:

1. En primer lugar se debe determinar el tiempo de ocupación de calles de rodaje asumiendo que no es necesario atravesar una pista activa usando la ecuación de tiempo de movimiento de un punto a otro.

$$t = v/d \quad (5.3)$$

donde:

t = tiempo de ocupación de calles de rodaje,

v = velocidad promedio de avión en calles de rodaje (20 nudos típicamente), y

d = distancia promedio hasta el edificio terminal

2. Tomar un número de datos representativos del tiempo de ocupación de calles de rodaje en el aeropuerto evaluado
3. Determinar la diferencia entre ambos tiempos de ocupación de calles de rodaje.

El resultado obtenido por este método debe evaluarse haciendo uso de la escala desarrollada para este procedimiento (Tabla 5.27).

Tabla 5.27 Escala de evaluación de tiempo de ocupación para calles de rodaje que atraviesan una pista activa

Diferencia entre tiempo de ocupación sin atravesar una pista activa y atravesando una pista	Nivel de Servicio	Puntuación
≥ 0% pero < 5%	A	5
≥ 5% pero < 10%	B	4
≥ 10% pero < 20%	C	3
≥ 20% pero < 30%	D	2
≥ 30% pero < 35%	E	1
> 30%	F	0

5.3.2.3 Tiempo de ocupación de plataforma

El tiempo de ocupación de plataforma se considera un factor crítico en la operación de la zona aérea de un aeropuerto. El tiempo de ocupación de los aviones en las áreas de plataforma para vuelos comerciales varía significativamente (Vásquez et al., 2011). Esto depende del tiempo

de embarque y desembarque de pasajeros y equipaje, la capacidad del avión utilizando la plataforma, el tipo de vuelo (doméstico o internacional) y el mantenimiento necesario para el tipo de avión en la plataforma, entre otros factores.

Las aerolíneas son las encargadas de determinar el tiempo de ocupación de plataforma necesario para cumplir con los procesos que se llevan a cabo en este periodo. Los tiempos en plataforma son parte del tiempo estimado para generar los itinerarios de vuelo. Por esta razón, una demora excesiva en este proceso afecta el itinerario de vuelos y por ende se producen demoras en los vuelos. Los vuelos comerciales que muestren una demora mayor a 15 minutos son considerados retrasados por la junta de estadísticas en transportación (BTS, por sus siglas en inglés).

Para evaluar el tiempo de ocupación de plataforma es necesario tomar una muestra representativa de este tiempo para el aeropuerto evaluado. Es necesario identificar los tiempos promedios de ocupación de plataforma que utilizan las aerolíneas del aeropuerto según las características del vuelo. Se debe identificar para cada vuelo: el tipo de vuelo (doméstico o internacional) y su capacidad. El tiempo promedio de ocupación de plataforma obtenido debe compararse con los valores máximos determinados por las aerolíneas para de esta forma asignar una puntuación a este factor usando la Tabla 5.28.

Tabla 5.28 Escala de evaluación de tiempo de ocupación en plataforma

Diferencia entre tiempo promedio de ocupación de plataforma (muestra-aerolínea)	Nivel de Servicio	Puntuación
≤ 0 min.	A	5
≥ 0 min. pero < 10 min.	B	4
≥ 10 min. pero < 20 min.	C	3
≥ 20 min. pero < 30 min.	D	2
≥ 30 min. pero < 40 min.	E	1
> 40 min.	F	0

La escala mostrada en la Tabla 5.28 se basa en un punto de inflexión a los 15 minutos de demora (3 puntos). Además, se provee un rango mayor de demora, en comparación con la escala de procesamiento de pasajeros, debido a que un pasajero en espera de un avión está pre-dispuesto a esperar más que para otros modos de transporte más comunes como el automóvil o los sistemas de transporte público.

CAPÍTULO 6. ESTUDIO DE CASO: EVALUACIÓN DEL AEROPUERTO SJU

En este capítulo se evalúa el Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín como estudio de caso para probar y validar los modelos y metodología desarrollados. Se evalúa el Terminal A como ejemplo para la evaluación de los componentes de un edificio terminal.

En las próximas secciones se utiliza la información obtenida de la evaluación de infraestructura del aeropuerto SJU y datos adicionales tomados para completar la evaluación del aeropuerto SJU. Los detalles de cada zona, categoría y factor evaluado son ilustrados con el propósito de mostrar la forma correcta de aplicar la metodología.

6.1 Evaluación de la Zona Terrestre

En la Tabla 6.1 se muestra el modelo desarrollado para evaluar la zona terrestre de un aeropuerto comercial con los resultados obtenidos para el aeropuerto SJU y su Terminal A. En las siguientes secciones se muestran los detalles de la evaluación.

Tabla 6.1 Modelo de evaluación de la zona terrestre en el aeropuerto SJU

Área de Evaluación	Zona	Categoría	Factor	Puntos
	Peso	Peso	Peso	(0-5)
1. Zona Terrestre	17.3/20%	86.5/100%		
1.1 Acceso al Aeropuerto		28%/35%	80/100%	
a) Modos de transporte disponibles			50/50%	5/5
b) Rutas de acceso			30/50%	3/5
1.2 Acceso al Edificio Terminal		58.5/65%	90/100%	
c) Estacionamiento públicos			35/35%	5/5
d) Área para carga y descarga de pasajeros			45/45%	5/5
e) Instalaciones peatonales			10/20%	2.5/5

6.1.1 Evaluación de Acceso al Aeropuerto SJU

Bajo esta categoría se evalúan los modos de transporte disponibles y las rutas de acceso al aeropuerto SJU

6.1.1.1 Modos de transporte disponibles

El aeropuerto SJU cuenta con tres tipos de transporte terrestre disponibles. Estos son el transporte privado, autobuses de transporte público y taxis. Utilizando la Tabla 5.1, este factor obtiene tres puntos en su evaluación ya que este es la puntuación para un aeropuerto con tres tipos de transporte disponibles.

6.1.1.2 Rutas de acceso

En la sección 2.4 de este documento se mencionan las vías de acceso al aeropuerto SJU. Las carreteras PR-26 y PR-17 brindan acceso a la zona comercial mientras que la carretera PR-190 brinda acceso a la zona de carga del aeropuerto. La Figura 6.1 muestra una sección típica de las dos vías de acceso a la zona comercial del aeropuerto SJU. Utilizando la Tabla 5.2, se obtienen dos puntos para este factor debido al número de accesos disponibles.



Figura 6.1 Carreteras de acceso a la zona comercial del aeropuerto SJU

En el caso del nivel categórico y de servicio de las vías, solo se toman en consideración las dos vías de acceso a la zona comercial. Ambas vías se consideran carreteras principales por lo que obtienen el punto asignado a esta característica. En el aspecto de nivel de servicio, ambas carreteras sufren de congestión crítica en los periodos pico de tráfico del aeropuerto por lo que se asume un nivel de servicio menor de D en ambas vías. En el caso de la carretera PR-17, se carga directamente del tráfico de la carretera PR-181 por ser su única conexión al aeropuerto por esta ruta y esta ruta muestra un nivel de servicio bajo en periodo pico del aeropuerto. Por esta razón, las vías de acceso pierden los dos puntos asignados a este aspecto. Las puntuaciones obtenidas en la evaluación de este factor se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Evaluación de Rutas de Acceso al Aeropuerto SJU

Accesos	Categoría	Nivel de Servicio	Puntos
PR-190 (Carga)	N/A	N/A	N/A
PR-17 (Comercial)	Principal	< D	1
PR-26 (Comercial)	Principal	< D	1

En total, el aeropuerto SJU obtiene tres puntos en la evaluación de rutas de acceso; dos puntos por el número de rutas de acceso y un punto en promedio por la evaluación de categoría y nivel de servicio de las vías de acceso a la zona comercial del aeropuerto.

6.1.2 *Evaluación de Acceso al Edificio Terminal*

En esta categoría se evalúa el estacionamiento, área de carga y descarga de pasajeros y las instalaciones peatonales del aeropuerto SJU.

6.1.2.1 Estacionamiento

El aeropuerto SJU embarcó cerca de 4.0 millones de pasajeros en el año calendario 2011 (FAA, 2014). El número máximo de embarques que permite evaluar el primer método de evaluación desarrollado por la FAA es de 4.0 millones. Por esta razón se decide utilizar este método para evaluar la necesidad de estacionamientos en el aeropuerto SJU. No se utiliza el segundo método descrito en la sección 5.1.2.1 ya que debido a la remodelación de dos de sus terminales es irrealista determinar el número de estacionamientos necesarios mediante los embarques a la hora pico del aeropuerto para la demanda actual.

Según la Figura 5.1, para aeropuertos con cuatro millones de embarques anuales es necesario un rango de entre 4,200 a 4,600 estacionamientos públicos. Se escoge el promedio de este rango (4,450) como la necesidad de estacionamientos para el aeropuerto SJU.

El aeropuerto SJU ofrece un total de 4,900 estacionamientos repartidos entre un multinivel de seis niveles con capacidad de 4,000 espacios y un área adyacente 900 espacios adicionales. Este número de estacionamientos es mayor al necesario según el método desarrollado por la FAA por lo que el aeropuerto obtiene el máximo de puntos asignados a este factor (cinco).

6.1.2.2 Área de carga y descarga de pasajeros

La evaluación del aeropuerto SJU se realiza mediante los requerimientos y recomendaciones para un aeropuerto de mediana capacidad. La Figura 6.2 muestra los ocho carriles contenidos frente al Terminal A del aeropuerto SJU y el espaciamiento entre puertas de entrada al terminal. Los cuatro carriles frente al terminal son separados por una mediana de los restantes tres carriles incluidos para la circulación de vehículos a los distintos terminales. Todos los carriles son utilizados tanto por el transporte público como por el transporte privado de igual forma.

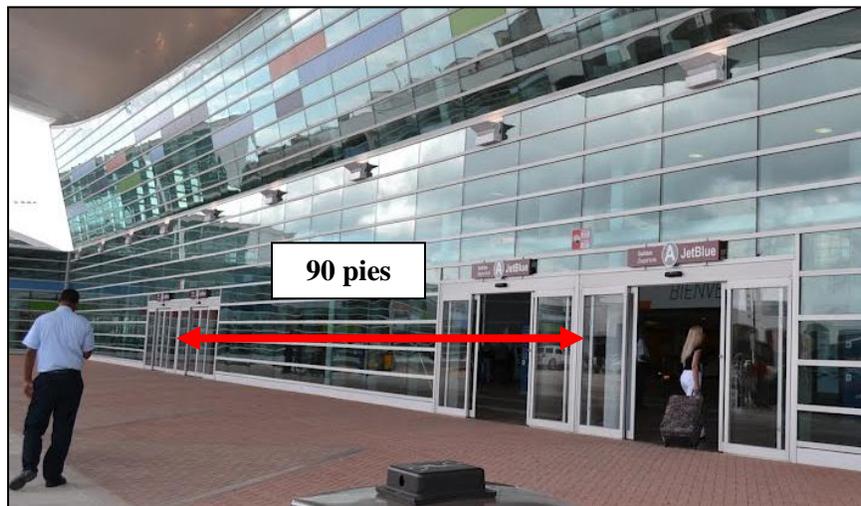
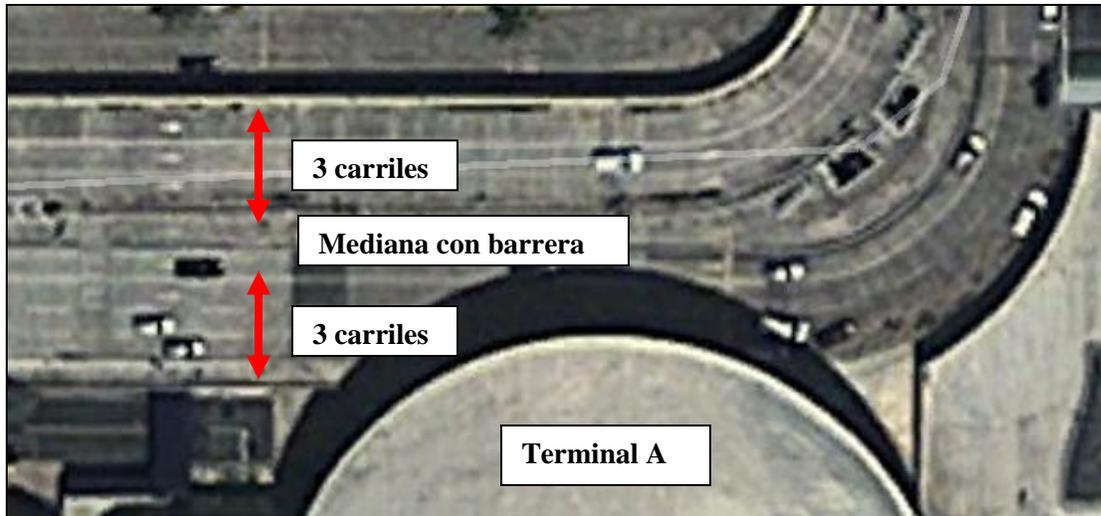


Figura 6.2 Carriles de acceso y distancia entre entradas al Terminal A del aeropuerto SJU

Según se mencionó en la evaluación del estacionamiento, las estadísticas de la FAA registraron 4.0 millones de embarques de pasajeros en el año 2011. El total de embarques registrados por la FAA para la totalidad de aeropuertos comerciales regulados por esta agencia para el 2011 fue de 724 millones. El aeropuerto SJU manejó 0.55% del total de pasajeros embarcados para este año. Este porcentaje de embarques cataloga al aeropuerto SJU, según la definición de capacidad por embarque de pasajeros creada por la ACI para aeropuertos regulados por la FAA, como uno de mediana capacidad (explicado en la sección 5.1.2.2).

La Tabla 6.3 muestra la puntuación obtenida por los diferentes elementos evaluados en el Terminal A del aeropuerto SJU. El Terminal A del aeropuerto cumple con cada uno de los elementos evaluados.

Tabla 6.3 Puntuación obtenida por los elementos de encintado evaluados en el Terminal A del aeropuerto SJU

Elemento	Recomendaciones de FAA	SJU	Puntos
1. Espacio entre puertas del terminal	100 -120 ft, máximo	< 100 ft	2
2. Encintado frente al terminal	12 ft, mínimo	55 ft	1
3. Número de carriles	3-4 (mediana capacidad)	6	2

6.1.2.3 Instalaciones peatonales

En esta sección se evalúan las instalaciones peatonales necesarias para llegar desde el estacionamiento del aeropuerto SJU hasta el Terminal A. El paso peatonal desde el estacionamiento multinivel hasta el Terminal A debe realizarse utilizando el puente peatonal que brinda acceso directo al Terminal B. Un pasajero estacionado utiliza el puente peatonal para luego cruzar una vía de siete carriles con mediana disponible para acortar el trayecto. El cruce peatonal de la vía es uno a desnivel con ancho de 14 pies para promover prioridad al paso peatonal sobre el flujo vehicular. El cruce se compone de un primer tramo de 33 pies de largo, una isleta central de 17 pies y un segundo tramo de 43 pies de largo. Luego de este cruce el pasajero puede decidir llegar al Terminal A utilizando el pasillo interno del Terminal B (ancho mayor a 15 pies) o utilizar la acera exterior la cual cuenta con ancho de 10 pies ocho pulgadas hasta llegar al terminal en donde se reduce a cinco pies justo antes de llegar al encintado del Terminal A (Figura 6.3, 120 pies de largo aproximadamente). Luego de este tramo el peatón llega al encintado frente al Terminal A evaluado previamente.

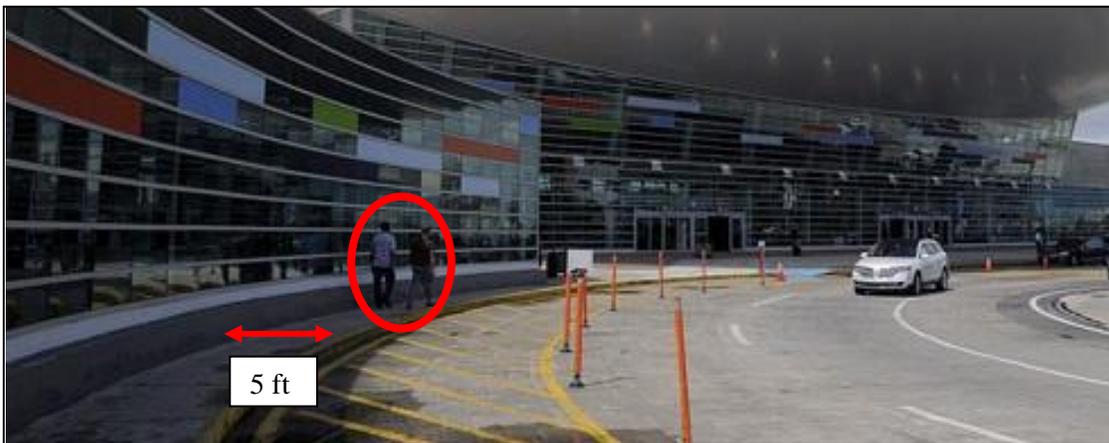


Figura 6.3. Terminal A del aeropuerto SJU de ancho de acera menor a los 12 pies recomendados

El aeropuerto SJU muestra una distancia promedio de caminata desde su estacionamiento multinivel hasta el Terminal A de aproximadamente 1300 pies; lo cual excede los 1000 pies

máximos recomendados por la FAA. Sin embargo, no se ofrece un sistema de transportación para los pasajeros que deban tomar esta ruta. Un tramo de acera de 120 pies incumple el mínimo recomendado de 12 pies por lo que se penaliza este elemento con el total de puntos asignados. Los cruces peatonales se encuentran debidamente identificados y marcados en los tramos desde el estacionamiento hasta los terminales. Además, los cruces peatonales del segundo nivel del aeropuerto (salidas) están contruidos a desnivel por lo que propicia el paso peatonal al paso vehicular y por lo tanto un mayor flujo de peatones. Sin embargo, esta práctica disminuye la capacidad de la carretera de circulación por lo que se asigna solo 0.5 puntos a este elemento. El tramo desde el estacionamiento al Terminal A provee todos los elementos necesarios para el uso de personas con discapacidades por lo que se le otorga el punto asignado a este elemento. El aeropuerto obtiene 2.5 puntos del total de cinco asignados a la evaluación de las instalaciones peatonales necesarias para el tráfico de pasajeros desde y hacia el Terminal A.

Tabla 6.4 Elementos evaluados para las instalaciones peatonales de la zona terrestre

Elemento	Puntuación
1. Distancia a pie al terminal y viceversa.	0
2. Ancho de aceras	0
3. Identificación y marcado de cruces	1
4. Cruces peatonales a desnivel	0.5
5. Instalaciones para discapacitados	1

6.2 Evaluación de la Zona Terminal

La evaluación de la zona terminal del aeropuerto SJU se lleva a cabo utilizando el Terminal A como estudio de caso. En este terminal se evalúan los diferentes factores considerados en el modelo de evaluación de terminales desarrollado en esta investigación. La Tabla 6.5 muestra el modelo de evaluación para un terminal con los resultados obtenidos en la evaluación del Terminal A del aeropuerto SJU.

Tabla 6.5 Resultados de evaluación del Terminal A del aeropuerto SJU

Área de Evaluación	Peso por relevancia a la Infraestructura y Operación de un aeropuerto			
	Zona	Categoría	Factor	Puntos
	Peso	Peso	Peso	(0-5)
2. Zona Terminal	23/35%	65.5/100%		
2.1 Procesamiento de Pasajeros		46.9/75%	52.8/85%	
a) Registro completo de pasajeros			10/15%	3.35/5
b) Auto-registro de pasajeros en kioscos			15/15%	5/5
c) Entrega de equipaje			14.3/15%	4.75/5
d) Revisión de seguridad			13.5/25%	2.7/5
e) Revisión de inmigración			0/15%	0/5
f) Reclamo de equipaje			15%	N/A
2.2 Influencias Adicionales		18.6/25%	74.2/100%	
g) Dispositivos de información			21/35%	3/5
h) Espacio para filas y flujo de pasajeros			25/35%	3.57/5
i) Número de asientos y área de espera por salida			28.2/30%	4.7/5

6.2.1 Terminal A del Aeropuerto SJU

La construcción del Terminal A del aeropuerto SJU culminó en el año 2004 a un costo de \$124 millones. El terminal fue construido con el propósito de propiciar el turismo en Puerto Rico brindando servicio exclusivamente a vuelos de excursiones o con destino al embarque en cruceros. La Figura 6.4 muestra la entrada al terminal antes de ser remodelado por la línea aérea que lo utiliza actualmente.



Figura 6.4 Terminal A del aeropuerto SJU (antes de ser remodelado)

El terminal estuvo inutilizado hasta su apertura en junio del 2012, luego de que una aerolínea decidiera invertir alrededor de \$5 millones en adaptaciones para su operación. El Terminal A cuenta con 7 salidas de aviones y actualmente se llevan a cabo alrededor de 62 operaciones diarias (Banuchi, 2012). Debido a su reciente construcción, comienzo de operaciones y la ventaja de que una sola línea aérea opera en este terminal, el Terminal A fue seleccionado para validar el modelo de evaluación de infraestructura y operación desarrollado para la realización de esta tesis.

6.2.2 Evaluación de Procesos en el Terminal

En el Terminal A del aeropuerto SJU se llevan a cabo la mayoría de los procesos normalmente realizados en un terminal comercial de aeropuerto. Para los pasajeros con origen en el aeropuerto SJU, el Terminal A incluye un área de registro con empleado dentro del terminal, la cual contiene siete espacios disponibles para el registro de pasajeros. Además, se provee la posibilidad de que el pasajero realice su propio registro en uno de sus 12 kioscos de autoregistro. Para los pasajeros que realizan su registro en los kioscos o vía internet se provee un área de entrega de equipaje la cual contiene nueve espacios disponibles. Para el proceso de revisión de seguridad se tienen disponibles tres líneas de rayos x con dos detectores de metales y un detector de explosivos y armas.

Para los pasajeros con destino en el Terminal A del aeropuerto SJU se tienen disponibles dos líneas de reclamo de equipaje en forma T. El terminal no provee aún un área de revisión de inmigración dentro de sus servicios disponibles, aunque se tiene en los planes a corto plazo desarrollar un área para llevar a cabo este proceso.

6.2.2.1 Evaluación de rendimiento

La evaluación de rendimiento del Terminal A incluye el tiempo de espera, tiempo de servicio, largo de fila y tiempo total en sistema. El periodo de toma de datos en el Terminal A es considerado de baja demanda o tiempo muerto, por esta razón se decide llevar a cabo un procedimiento distinto al especificado en la metodología desarrollada para la evaluación de terminales. Se utilizó un modelo de simulación de los procesos del terminal para evaluar los mismos. Las ventajas de simulación son (Bartolomei, 2011):

- elimina riesgos e incertidumbres,
- permite la obtención de datos sin la necesidad de medirlos en campo,
- explora nuevos procedimientos o estrategias sin interrumpir el sistema real
- evita o elimina costos y recursos innecesarios, y
- evita la necesidad de un tamaño de muestra específico para su análisis.

Las desventajas de utilizar simulación son (Bartolomei, 2011):

- requiere de entrenamiento especializado,
- los resultados pueden ser difíciles de interpretar,
- consume mucho tiempo (desarrollo, verificación y validación),
- puede ser costoso, y
- provee información, mas no soluciones.

Este método, aunque más tedioso y complicado que el análisis de una muestra, permitió hacer los ajustes para lograr analizar los procesos del Terminal A en temporada alta y hacer uso de los recursos disponibles para el análisis.

El modelo de simulación para el análisis de rendimiento de los procesos en el Terminal A se llevó a cabo usando el programa SIMIO. SIMIO es un programa de la plataforma Windows desarrollado para la simulación del flujo de procesos de eventos discretos, basado en objetos inteligentes y procedimientos gráficos. La principal ventaja de este programa es que no requiere codificación para crear los modelos, es simplemente un procedimiento gráfico. En las próximas secciones se detalla el procedimiento llevado a cabo para crear los modelos de los procesos y evaluar sus resultados.

6.2.2.1.1 Ajuste de datos a distribuciones estadísticas

Para crear un modelo de simulación es necesario identificar la distribución de probabilidad que más se ajuste a los datos tomados para el proceso a simular. Utilizando el

programa estadístico *Stat fit* se llevó a cabo un proceso de selección de distribuciones para el tiempo entre llegadas y para el tiempo de servicio para cada proceso. El proceso de selección de estas distribuciones es uno largo y tedioso en donde deben considerarse un número amplio de características y situaciones las cuales alargan el proceso de realizar la mejor selección. Por esta razón, solo se muestra un ejemplo del procedimiento llevado a cabo para la selección de una distribución que ajuste a los datos de tiempo entre llegadas y tiempo de servicio, individualmente para el proceso de registro con empleado. El procedimiento en detalle llevado a cabo para la selección de las distribuciones es mostrado en el Apéndice C.

El primer paso en el procedimiento de selección de distribuciones fue obtener la estadística descriptiva de los datos la cual nos brinda información sobre su dispersión. Teniendo conocimiento sobre las curvas que definen las distintas distribuciones, se utilizaron los histogramas para reducir el número de distribuciones que se podrían ajustar a los datos. Se probó en el programa *Stat fit* el ajuste de las distribuciones seleccionadas mediante las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorof Smirnov (K-S) y Chi-cuadrada. Estas pruebas indicaron, a un 95% de confianza, la bondad de ajuste de las distribuciones seleccionadas mediante el uso del valor de p como indicador. La figura 6.6 muestra los detalles de cuando es recomendado utilizar la prueba K-S sobre la Chi-cuadrada y viceversa (Bartolomei, 2011). Estas recomendaciones están atadas a la utilización de distribuciones discretas o continuas. Una distribución discreta se diferencia de una continua en que se asocia a una variable discreta la cual varía con un cambio en el sistema y se identifica con valores enteros. La distribución continua varía constantemente con el tiempo y puede asumir cualquier valor real (Bartolomei, 2011). Se escoge la distribución que mayor valor de p muestre de no tomarse en cuenta ninguna otra característica adicional.

Tabla 6.6 Pruebas de bondad de ajuste Kolmogorof-Smirnov y Chi-cuadrada (Bartolomei, 2011)

Muestra	Tipo de distribución	
	Continua	Discreta
Menos de 100 datos	K-S	
Al menos 100 datos	K-S, Chi-cuadrada	Chi-cuadrada

Para el siguiente ejemplo de selección de distribución, se utilizaron los datos obtenidos de tiempo entre llegadas y tiempo de servicio en el proceso de registro con empleado en el Terminal A del aeropuerto SJU. Siguiendo los pasos descritos anteriormente, se utilizó la estadística descriptiva de los datos para identificar anomalías en los datos utilizados. Las Tablas 6.7 y 6.8

muestran la estadística descriptiva de los datos de tiempo entre llegada y tiempo de servicio, respectivamente para los procesos analizados.

Tabla 6.7 Estadística descriptiva de los datos de tiempo entre llegadas para los procesos analizados

Estadística Descriptiva	Registro Empleado	Registro Kioscos	Entrega Equipaje	Revisión de Seguridad
Número de Datos	105	105	105	105
Mínimo (min.)	0.033	0.017	0.05	0.033
Máximo (min.)	4.56	5.96	3.65	2.92
Promedio (min.)	0.81	0.9	0.67	0.66
Desviación Estándar (min.)	0.87	1.05	0.69	0.56

Tabla 6.8. Estadística descriptiva de los datos de tiempo de servicio para los procesos analizados

Estadística Descriptiva	Registro Empleado	Registro Kioscos	Entrega Equipaje	Revisión de Documentos	Revisión de Equipaje
Número de Datos	103	103	104	104	105
Mínimo (min.)	0.68	0.7	0.58	0.15	0.725
Máximo (min.)	6.05	5.5	4.15	1.32	8.81
Promedio (min.)	2.1	2.15	1.7	0.37	3.92
Desviación Estándar (min.)	1.23	1.02	0.76	0.17	1.71

La descripción estadística de los datos nos asegura que se analiza el número correcto de datos en el programa *Stat Fit*. Además, observamos preliminarmente el comportamiento de los datos como por ejemplo promedio y desviación estándar. Para esta investigación se utilizó un rango de tres veces la desviación estándar de los datos para llevar a cabo una reducción de estos. Los datos fuera de un rango más menos tres veces la desviación estándar de los datos fueron eliminados.

Observando los histogramas (Figuras 6.5 y 6.6) fue posible descartar las distribuciones discretas ya que estos muestran un cambio contante en el porciento representativo de los intervalos de tiempo escogidos.

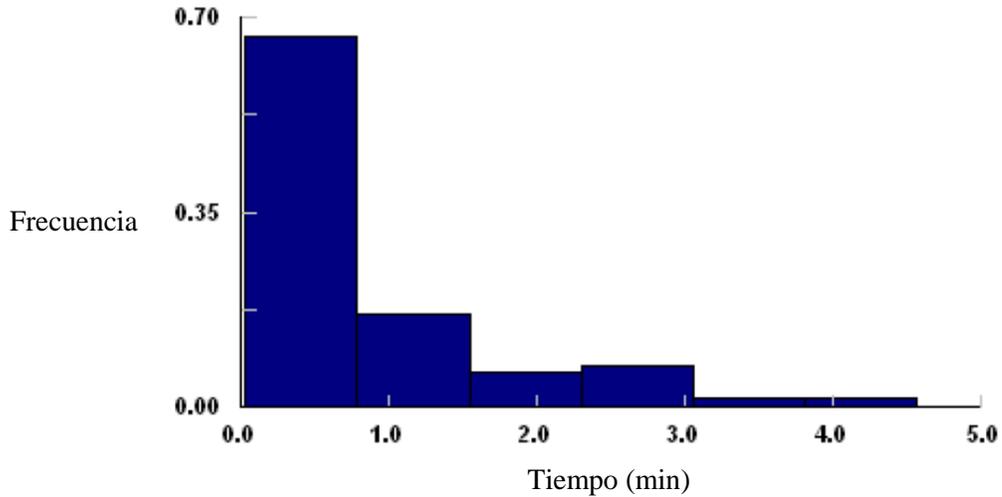


Figura 6.5 Histograma de datos de tiempo entre llegadas para el proceso de registro con empleado (*Stat fit*)

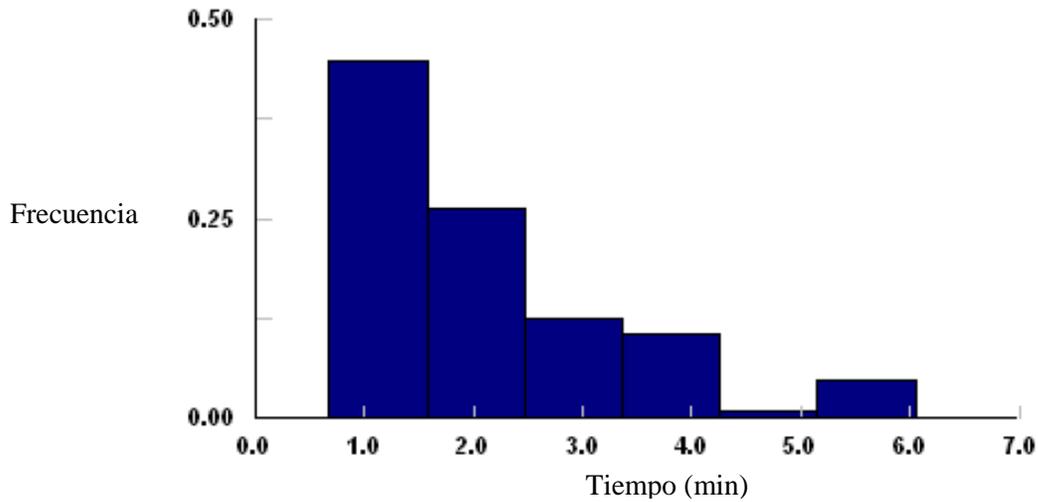


Figura 6.6 Histograma de datos de tiempo de servicio para el proceso de registro con empleado (*Stat fit*)

Utilizando solo distribuciones continuas, se realizaron las pruebas de bondad de ajuste para cada una de las muestras de tiempo analizadas. Las Tablas 6.10 y 6.11 muestran las distribuciones continuas analizadas con los respectivos valores de p resultantes. Toda distribución con valor de p menor que 0.05 es rechazada lo cual indica que no existe prueba suficiente para determinar que esta distribución se ajusta en un 95% de nivel de significancia a los datos analizados (Bartolomei, 2011).

Tabla 6.9 Distribuciones analizadas para los datos de tiempo entre llegadas en el proceso de registro de pasajeros con un empleado

Distribución	Valor de p		Resultado
	Chi-cuadrada	Kolmogorof Smirnov	
Beta	0.63	0.629	No rechazada
Exponencial	0.658	0.638	No rechazada
Gamma	0.576	0.63	No rechazada
Log-Logistic	0.823	0.891	No rechazada
Lognormal	0.576	0.669	No rechazada
Normal	0	0.004	Rechazada
Weibull	0.576	0.624	No rechazada

Tabla 6.10 Distribuciones analizadas para los datos de tiempo de servicio en el proceso de registro de pasajeros con un empleado

Distribución	Valor de p		Resultado
	Chi-cuadrada	Kolmogorof Smirnov	
Beta	0.0449	0.0182	No Rechazada
Erlang	0.113	0.00858	No Rechazada
Exponential	0	0	Rechazada
Gamma	0.0562	0.0186	Rechazada
Log-Logistic	0.0311	0.278	No Rechazada
Lognormal	0.0671	0.129	No rechazada
Normal	0	0	Rechazada
Weibull	0.00327	0.0109	No Rechazada

En las Tablas 6.9 y 6.10 se muestra en negrillas la distribución escogida para cada muestra analizada. Para la muestra de tiempo entre llegadas se escoge la distribución exponencial, mientras que para el tiempo de servicio se escoge la distribución log-logistic. Para los datos de tiempo entre llegadas, se utiliza la prueba de K-S como referencia para escoger una distribución ya que el número de datos de la muestra es menor a 100. Como se puede apreciar en la Tabla 6.9, para los datos de tiempo entre llegadas la distribución con mayor valor de p es la log-logistic. Sin embargo, por asesoramiento de la Dra. Sonia Bartolomei (catedrática del departamento de ingeniería industrial del RUM y experta en simulación de sistemas), se elige la distribución exponencial. Esto ya que, además de mostrar un valor de p significativo, es la distribución más comúnmente utilizada para datos de tiempo entre llegadas para modelos de simulación.

Para los datos de tiempo de servicio se eligió la distribución log-logistic ya que fue la distribución con mayor valor de p para las pruebas de bondad de ajuste realizadas. Las Figuras

6.7 y 6.8 muestran las curvas de las distribuciones escogidas mediante el analisis graficadas junto a los histogramas para cada muestra analizada con sus respectivas ecuaciones.

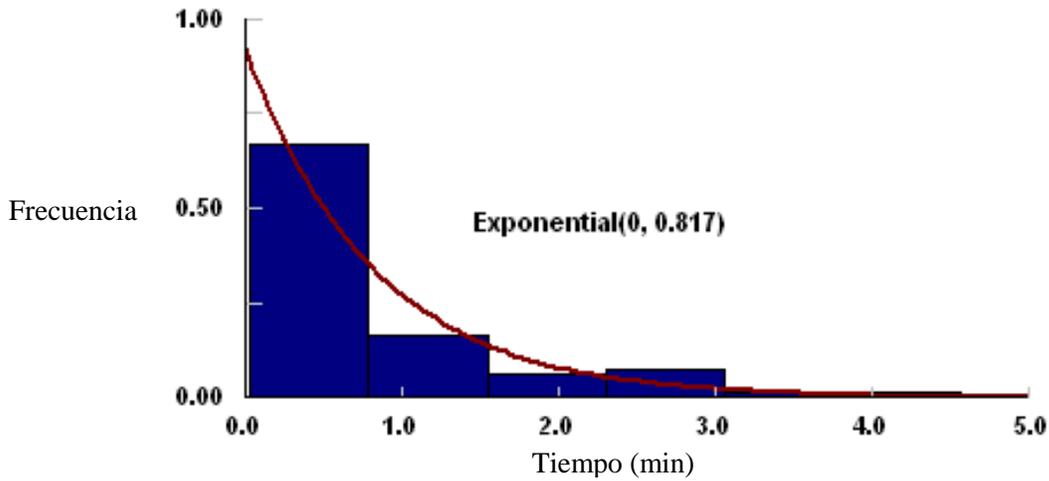


Figura 6.7 Gráfica de distribución escogida para la muestra de datos de tiempo entre llegadas en el proceso de registro con empleado (*Stat fit*)

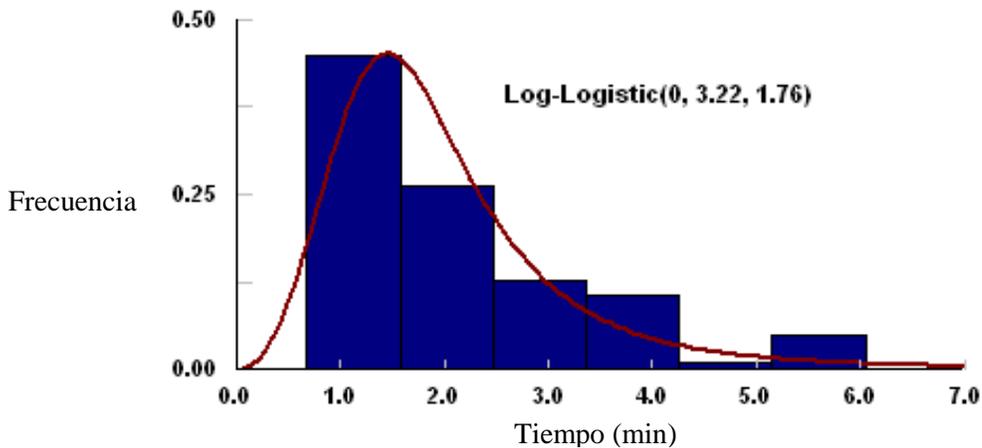


Figura 6.8. Gráfica de distribución escogida para la muestra de datos de tiempo de servicio en el proceso de registro con empleado (*Stat fit*)

El mismo proceso fue llevado a cabo para elegir la distribución que mejor se ajusta a la muestra obtenida para cada proceso. Las Tablas 6.11 y 6.12 muestran las distribuciones escogidas para cada proceso evaluado. El proceso realizado para la elección de cada distribución se incluye en el Apéndice C.

Tabla 6.11 Distribuciones escogidas para el tiempo entre llegadas de cada proceso evaluado en el Terminal A

Proceso	Distribución	Valor de p	
		Chi-cuadrada	Kolmogorof Smirnov
Registro con empleado	Exponencial	0.658	0.638
Registro en kioscos	Exponencial	0.134	0.504
Entrega de equipaje	Log-Logistic	0.109	0.289
Revisión de seguridad	Gamma	0.796	0.905

Tabla 6.12 Distribuciones escogidas para el tiempo de servicio de cada proceso evaluado en el Terminal A

Proceso	Distribución	Valor de p	
		Chi-cuadrada	Kolmogorof Smirnov
Registro con empleado	Log-logistic	0.0311	0.278
Registro en kioscos	Lognormal	0.944	0.746
Entrega de equipaje	Lognormal	0.811	0.894
Revisión de documentos	Log-Logistic	0.971	0.622
Revisión de pasajeros y Equipaje	Beta	0.374	0.926

6.2.2.1.2 Construcción, verificación y validación de los modelos de simulación

Se desarrolló un modelo de simulación, utilizando el programa SIMIO, para cada proceso del Terminal A del aeropuerto SJU, Cada modelo utiliza una fuente de llegadas de pasajeros la cual nombramos *Llegadas*. Esta fuente genera un número de pasajeros por un periodo de tiempo, utilizando como insumo la distribución escogida para el tiempo entre llegadas de pasajeros y las características asociadas a esta distribución. Añadiendo a cada fuente de llegadas la probabilidad de llegada de grupos de pasajeros (uno a seis pasajeros por grupo), se incluye la posibilidad de llegada de grupos de pasajeros. Este factor varía según la muestra de datos tomada.

Un servidor es utilizado para ofrecer el servicio a los pasajeros cuyo nombre es igual al nombre del proceso realizado. El servidor utiliza como insumo la distribución escogida para el tiempo de servicio de cada proceso, con las características obtenidas para esta distribución. Además, se añadió el número de servidores disponibles por cada servicio para lograr crear un modelo más realista. Finalmente se utilizó un destructor para eliminar los pasajeros ya atendidos, el cual lleva el nombre de *Salidas*. Para conectar la fuente con el servidor, se utilizaron pasos (*paths* en inglés) a los cuales se le asignó una distancia igual a la distancia caminada por los pasajeros en este tramo y una velocidad de caminata de 3.5 pies por segundo para un nivel de servicio de C, según el informe 616 de la NCHRP (2008). Las conexiones entre los servidores y el destructor se realizaron mediante un conector, el cual permite un movimiento instantáneo de

los pasajeros a su destino (sin incluir tiempo al proceso). La Figura 6.9 muestra como ejemplo la configuración del proceso de registro de pasajeros con un empleado.

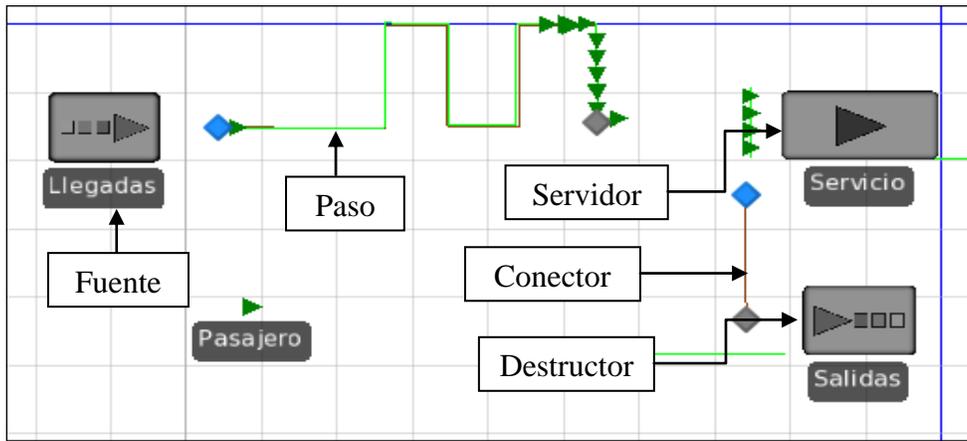


Figura 6.9 Configuración del modelo de simulación para el proceso de registro de pasajeros con un empleado (SIMIO)

El número de pasajeros que puede atender cada servidor se asigna en base al número de pasajeros atendidos actualmente en cada uno de los distintos procesos. Los procesos de registro de pasajeros con empleado y entrega de equipaje utilizan un sistema compartido el cual permite que los empleados encargados de uno de los procesos atienda pasajeros del otro proceso cuando no tengo pasajero en la fila de su proceso. Esta característica no fue incorporada en los modelos ya que los modelos son desarrollados independientemente el uno del otro. Sin embargo, este sistema no afecta los resultados ya que el modelo de simulación se analiza para el periodo pico del día y en este periodo todos estos procesos deben estar ocupados atendiendo sus pasajeros. La Tabla 6.13 muestra el número de pasajeros que puede ser atendida simultáneamente en cada proceso para la condición actual. Se asume un total de ocho pasajeros atendiéndose simultáneamente en dos correas de revisión de equipaje y un detector de metales de rayos X para los pasajeros (cuatro por correa).

Tabla 6.13 Capacidad de servicio actual de pasajeros o grupos por proceso en el Terminal A

Proceso	Capacidad de servicio
Registro con empleado	5
Registro en Kioscos	12
Entrega de Equipaje	4
Revisión de Documentos	2
Revisión de Pasajeros y Equipaje	8

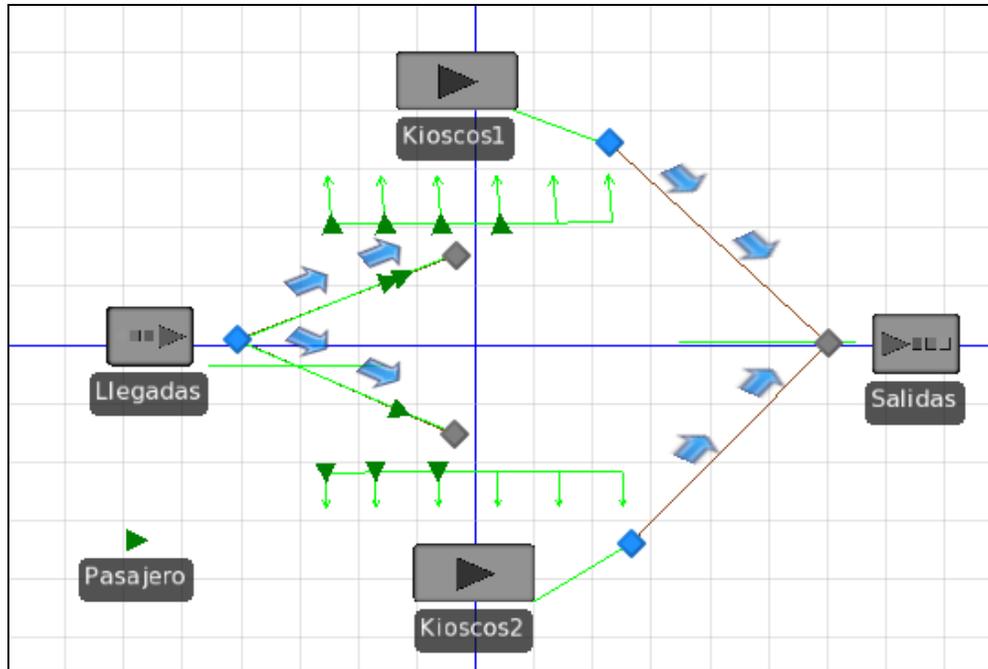


Figura 6.11 Instante de animación del modelo de simulación desarrollado para el proceso de registro de pasajeros en Kioscos de auto-registro (*SIMIO*)

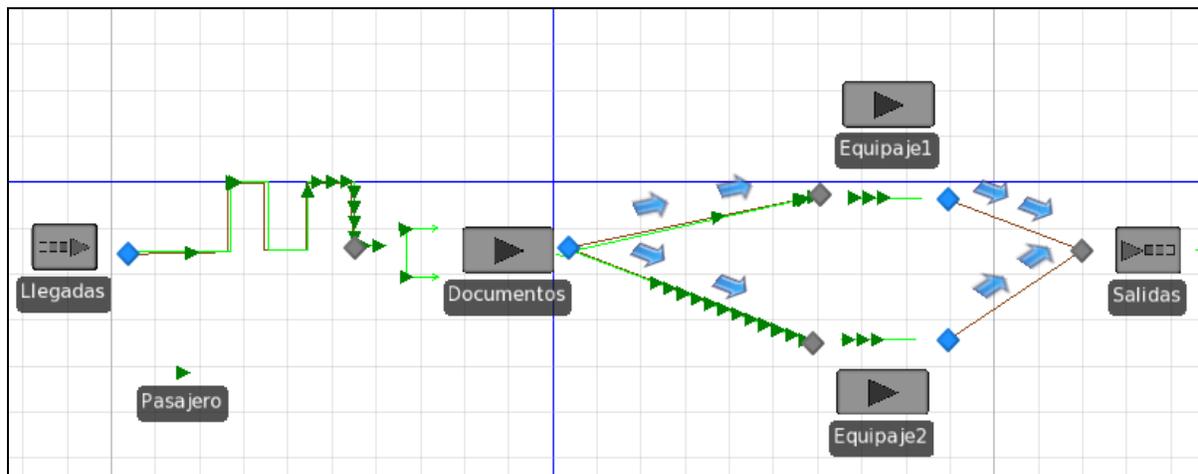


Figura 6.12 Instante de animación del modelo de simulación desarrollado para el proceso de revisión de seguridad (*SIMIO*)

Para validar los modelos es necesario representar la situación existente de los procesos en una simulación. La validación se realizó llevando a cabo 500 replicas del modelo de simulación creado para la verificación. Las replicas implican utilizar un conjunto fijo de condiciones de comienzo y termino de corrida, llevando a cabo un número de corridas con conjuntos diferentes, separados y no solapados de números aleatorios. Realizar un número alto de corridas permite que el sistema se estabilice y nos brinde la posibilidad de validar el modelo (Bartolomei, 2011).

Los modelos fueron validados utilizando el número promedio de pasajeros que llegaron en el tiempo de corrida de la simulación y el tiempo promedio de servicio obtenido por los modelos. Se comparó el rango de medidas de desempeño obtenidas mediante la simulación con los promedios reales obtenidos en campo. La Tabla 6.14 muestra un ejemplo de los resultados de un experimento de 500 réplicas para el registro de pasajeros con un empleado. Los resultados enmarcados dentro del recuadro son las medidas de desempeño utilizadas para validar los modelos. Se utilizó el promedio para construir un intervalo de confianza de un 95% mediante el uso de la columna nombrada *half width*. Este intervalo de confianza indica que el promedio del valor escogido se hallará dentro de este intervalo el 95% de las veces que se obtenga mediante el mismo modelo.

Category	Data Item	Statistic	Average	Minimum	Maximum	Half Width
Throughput	NumberEntered	Total	92.0400	65.0000	114.0000	0.7053
	NumberExited	Total	92.0400	65.0000	114.0000	0.7053
Content	NumberInStation	Average	3.5805	2.6922	3.8730	0.0231
		Maximum	4.0000	4.0000	4.0000	0.0000
HoldingTime	TimeInStation	Average (Mi...)	2.0376	1.7139	2.5200	0.0121
		Maximum (Mi...)	8.7369	4.2057	39.0213	0.3634
		Minimum (Mi...)	0.3967	0.0834	0.8688	0.0112
Throughput	NumberEntered	Total	95.9540	69.0000	118.0000	0.7092
	NumberExited	Total	92.0400	65.0000	114.0000	0.7053
FlowTime	TimeInSystem	Average (Mi...)	7.8981	3.8769	15.8540	0.2180
		Maximum (Mi...)	15.8750	7.7802	40.7329	0.4335
		Minimum (Mi...)	2.4942	1.8297	4.6008	0.0309
		Observations	92.0400	65.0000	114.0000	0.7053
Throughput	NumberEntered	Total	92.0400	65.0000	114.0000	0.7053
	NumberExited	Total	92.0400	65.0000	114.0000	0.7053
Content	NumberInStation	Average	0.0103	0.0060	0.0184	0.0002
		Maximum	4.7100	4.0000	9.0000	0.0528
HoldingTime	TimeInStation	Average (Mi...)	0.0047	0.0040	0.0057	0.0000
		Maximum (Mi...)	0.0133	0.0113	0.0251	0.0001
		Minimum (Mi...)	0.0028	0.0028	0.0028	0.0000
Throughput	NumberEntered	Total	117.2020	78.0000	174.0000	1.4288

Tabla 6.14 Resultados del modelo de simulación creado para el proceso de registro de pasajeros con empleado (SIMIO)

Las Tablas 6.15 y 6.16 muestran los resultados de las medidas de desempeño obtenidas de los datos y arrojadas por el modelo de simulación de cada proceso. Las Tabla 6.15 incluye los

resultados para los tiempos entre llegada de cada proceso mientras que la Tabla 6.16 incluye los tiempos de servicio. En las tablas también se muestran el porcentaje de error del valor medido con el intervalo obtenido mediante el modelo. Para este modelo se aceptó un máximo de 10% de error en el intervalo comparado con el valor real. Los modelos compararon favorablemente con el sistema real estudiado ya que ninguno de los errores sobrepasan el 10% aceptado, por lo que se validaron los modelos de simulación desarrollados.

Tabla 6.15 Porcentaje de error entre el total de pasajeros que llegó en el periodo de estudio y el promedio de pasajeros que llega en cada modelo para este mismo periodo

Proceso Simulado	Llegadas (Muestra)	Intervalo de número de llegadas (Simulación)		Porcentaje de Error	
Registro con empleado	115	115.8	118.6	0.70%	3.13%
Kioscos	177	176.7	180	0.17%	1.69%
Entrega Equipaje	153	160.7	167.5	5.03%	9.48%
Revisión Documentos	153	164.5	167.3	7.52%	9.35%
Revisión Equipaje	153	164.5	167.3	7.52%	9.35%

Tabla 6.16 Porcentaje de error entre el tiempo promedio de servicio de los datos y el tiempo promedio de servicio obtenido en cada modelo para este mismo periodo

Proceso Simulado	Promedio de tiempo de servicio (Muestra) min.	Intervalo de tiempo de servicio (Simulación) min.		Porcentaje de Error	
Registro con empleado	2.097	2.026	2.05	3.39%	2.24%
Kioscos	2.154	2.123	2.141	1.44%	0.60%
Entrega Equipaje	1.793	1.678	1.688	6.41%	5.86%
Revisión Documentos	0.374	0.364	0.366	2.67%	2.09%
Revisión Equipaje	3.929	3.971	3.916	1.07%	0.33%

6.2.2.1.3 Proyección de demanda

Los modelos de simulación son una buena herramienta para obtener información sobre un sistema o proceso ahorrando tiempo y esfuerzo en la toma de medidas en el sistema real. Las

simulaciones también permiten hacer proyecciones, incorporar nuevos productos y realizar cambios para analizar los cambios que sufre el sistema con cualquiera de estas situaciones.

La simulación validada de los procesos modelados pudo utilizarse para obtener información valiosa del sistema ya que representa a cabalidad la situación actual del Terminal A en el aeropuerto SJU. Entre las medidas de desempeño más importantes obtenidas mediante los modelos están: el tiempo promedio en proceso para cada pasajero, el número máximo de pasajeros en fila y el tiempo promedio en fila de pasajeros. Se creó un experimento de 500 réplicas con los modelos validados, cambiando sólo la duración de cada réplica a una hora para cada modelo. Igualar el tiempo de corrida para cada modelo permitió hacer comparaciones entre estos. La Tabla 6.17 muestra los resultados analizados de cada simulación a la hora pico para la situación actual del Terminal A en el aeropuerto SJU.

Tabla 6.17 Resultados de simulación de situación actual del Terminal A en el aeropuerto SJU

Medida de Desempeño	Registro Empleado	Registro Kioscos	Entrega Equipaje	Revisión de Seguridad
Tiempo promedio en sistema (min.)	8.31	2.23	7.59	11.74
Número máximo de pasajeros en fila	25.7	1.4	28.3	37.7
Tiempo promedio en fila (min.)	4.69	0	4.28	5.2

Los resultados obtenidos con los modelos para la hora pico de la condición actual representan de forma lógica el movimiento de pasajeros observado en campo. La serpentina designada para almacenar la fila de pasajeros en los procesos de registro con empleado y entrega de equipaje provee un espacio de aproximadamente 125 pies de largo por 4.5 pies de ancho. Para el proceso de revisión de seguridad se ofrece una serpentina de 175 pies de largo por 4.5 pies de ancho. Cada pasajero ocupa un espacio de dos pies en fila (Newfville, 2007). Según el espacio requerido por pasajero, los procesos de registro con empleado y entrega de equipaje ofrecen espacio para almacenar hasta 62 pasajeros en el área de fila, mientras que el proceso de revisión de seguridad ofrece capacidad para 87 pasajeros.

El periodo del año en que se tomaron los datos utilizados para construir los modelos de simulación (septiembre y octubre), se considera un periodo de temporada baja o de baja demanda en aeropuertos. Esto significa que el aeropuerto SJU se encontraba trabajando con una demanda mucho menor a la demanda esperada en días picos del año. Por esta razón, se determina una demanda esperada para periodos pico del año y se realiza una proyección de la demanda en los modelos.

El itinerario de vuelos para el mes de octubre 2012 a la hora pico del día para el Terminal A muestra la salida de 6 vuelos. Si asumimos que los vuelos se venden por completo, sería una demanda total de 650 pasajeros. Las llegadas de los pasajeros podrían distribuirse equitativamente en tres horas lo cual generaría un total de 217 pasajeros llegando en la hora pico de un día de temporada alta. Sin embargo, en realidad la llegada de pasajeros no ocurre en partes iguales para las tres horas pico definidas. Gran parte de los pasajeros llegaría en la segunda hora pico, es por esto que se asume que un 50% adicional de pasajeros (25% de la primera hora pico y 25% de la tercera hora pico) que llega en la segunda hora pico debido al solape de pasajeros que ocurre en este intervalo de tiempo. Esto resulta en una hora pico con carga asumida de 325 pasajeros en temporada alta del Terminal A del aeropuerto SJU. Para lograr mantener la distribución muestreada para la situación actual del terminal en los diferentes procesos, se disminuye la razón de llegada en el proceso de seguridad. Este es el único proceso que debe atender a todos los pasajeros generados y por lo tanto se utilizó para obtener un porcentaje de aumento para los demás procesos. En base al porcentaje de incremento obtenido del proceso de seguridad, se ajusta el total de llegadas para los demás procesos. La Tabla 6.18 muestra el total de llegadas tomadas a la hora pico actual, estimado de hora pico estimada en temporada alta y la hora pico en temporada alta generada por los modelos.

Tabla 6.18 Número de pasajeros generados para la demanda estimada en la hora pico de la temporada alta en el terminal A del aeropuerto SJU

Proceso	Número promedio de pasajeros generados		
	Hora pico actual (Modelos)	Hora pico temporada alta (Estimado)	Hora pico temporada alta (Modelos)
Registro con empleado	130	289	285.3
Registro en Kioscos	114	254	254.3
Entrega de Equipaje	142.3	317	312.3
Revisión de Seguridad	145.8	325	324

Utilizando la razón de pasajeros que generó el número de pasajeros estimados para la hora pico en temporada alta y el número de recursos utilizados actual se realiza un experimento de 500 réplicas para analizar el comportamiento de los procesos en los modelos y determinar la necesidad de recursos adicionales. La Tabla 6.19 muestra los resultados de la proyección.

Tabla 6.19 Resultados de proyección de demanda en los modelos utilizando los recursos existentes

Medida de Desempeño	Registro Empleado	Registro Kioscos	Entrega Equipaje	Revisión de Seguridad
Tiempo promedio en sistema (min.)	19.8	2.6	18.0	22.4
Número máximo de pasajeros en fila	164	7	112	201.4
Tiempo promedio en fila (min.)	16.7	0.4	15.0	15.7

Los resultados obtenidos de la proyección realizada muestran tiempos promedios de pasajeros en sistema sobre los 15 minutos para los procesos más utilizados y sobre 20 minutos para el proceso de seguridad. Además, el número máximo de pasajeros en fila sobrepasa en la mayoría de los procesos la capacidad de pasajeros en fila estimada. Los procesos de registro con empleado, entrega de equipaje y revisión de seguridad muestran tiempos de espera igual o mayores a 15 minutos. Según las escalas de evaluación desarrolladas por la ACRP para aeropuertos, tiempos de espera mayores a 15 minutos representan un nivel de servicio deficiente. Los niveles de servicio para estos resultados son explicados en detalle en la sección 6.2.1.1.4.

El Terminal A del aeropuerto SJU cuenta con la capacidad de incrementar el número de recursos cuando la demanda así lo amerite. El terminal cuenta con capacidad hasta para siete empleados de registro, nueve empleados para entrega de equipaje y tres líneas de revisión de seguridad con un detector de metales y un rastreador por imagen de cuerpo entero. La demanda estimada para las temporadas pico del terminal muestran la necesidad de recursos adicionales en los resultados de la proyección simulada. Es por esto que se desarrolla una simulación adicional, la cual sirve para determinar si los recursos dan abasto para ofrecer un servicio satisfactorio a los pasajeros en el terminal.

La Tabla 6.20 muestra los resultados de la simulación de los procesos en el Terminal A utilizando los recursos disponibles para ofrecer un nivel de servicio satisfactorio a la demanda estimada en temporada alta para el terminal. Al igual que en la proyección anterior se llevan a cabo 500 réplicas con la misma razón de llegadas estimada para los distintos procesos.

Tabla 6.20 Resultados de proyección de demanda en los modelos utilizando los recursos necesarios para ofrecer un nivel de servicio satisfactorio

Medida de Desempeño	Registro Empleado	Registro Kioscos	Entrega Equipaje	Revisión de Seguridad
Tiempo promedio en sistema (min.)	11.6	2.6	8.2	17.6
Número máximo de pasajeros en fila	82.3	7	45.5	144.1
Tiempo promedio en fila (min.)	8.1	0.4	4.9	12.0

Las simulaciones utilizaron una mayor cantidad de recursos en tres de los procesos. Para el proceso de registro con empleado se utilizaron los siete espacios disponibles para la atención de pasajeros en este proceso. Los insumos para el proceso de registro en kioscos no fueron alterados ya que los recursos proporcionados satisfacen e incluso son subutilizados por la baja demanda que muestran. El proceso de entrega de equipaje solo requirió la utilización de 6 empleados, de los nueve espacios disponibles, para lograr un tiempo de espera y tiempo en sistema mucho menor al obtenido en nuestra primera proyección. Para el proceso de revisión de seguridad se incorporó una línea de revisión de equipaje y un detector de metales adicional. Estos son el máximo de recursos utilizables para este proceso actualmente en el terminal. Los resultados muestran mejora, en comparación con la primera proyección, en el tiempo promedio de pasajeros en sistema y pasajeros en fila para todos los procesos alterados. Los resultados son evaluados en la próxima sección.

6.2.2.1.4 Evaluación de resultados

Los resultados utilizados para evaluar el rendimiento del procesamiento de pasajeros son obtenidos mediante la simulación generada para periodos de alta demanda en el Terminal A en los procesos de registro y revisión de seguridad. Se utilizan los recursos disponibles para incrementar la productividad y el nivel de servicio a su mayor valor posible.

Utilizando la escala mostrada en la Tabla 5.9, se evalúan los tiempos de espera de los procesos en el Terminal A. Los tiempos de espera evaluados son mostrados en la Tabla 6.21 junto con el nivel de servicio y la puntuación obtenida. Este tiempo de espera fue el resultado de la simulación de los procesos en el Terminal A en un periodo de alta demanda. Todos los procesos muestran un nivel de servicio entre excelente y alto excepto el proceso de revisión de seguridad el cual muestra un nivel de servicio bueno de C.

Tabla 6.21 Nivel de servicio y puntuación asignada al tiempo de espera para cada proceso evaluado para la demanda estimada periodo de alta demanda

Proceso	Tiempo Promedio de Espera en Fila (min)	Nivel de Servicio	Puntuación
Registro con empleado	8.1	B	1.6
Registro en Kioscos	0.4	A	2.0
Entrega de Equipaje	4.9	A	2.0
Revisión de Seguridad	12.0	C	1.2

El tiempo de procesamiento o servicio se evalúa utilizando el tiempo promedio de servicio calculado mediante los datos recolectados. La evaluación de este tiempo se lleva a cabo utilizando la escala de nivel de servicio mostrada en la Tabla 5.9. La Tabla 6.22 muestra el tiempo promedio de servicio para cada proceso junto con el nivel de servicio y puntuación obtenida por proceso. El nivel de servicio en todos los procesos es bueno por lo tanto no representan una demora adicional de la requerida normalmente en estos procesos.

Tabla 6.22 Nivel de servicio y puntuación asignada al tiempo promedio de servicio obtenido para los datos recolectados

Proceso	Tiempo Promedio de Servicio (min)	Nivel de Servicio	Puntuación
Registro con empleado	2.10	A	1
Registro en kioscos	2.15	A	1
Entrega de equipaje	1.79	A	1
Revisión de seguridad	3.92	A	1

El último factor evaluado mediante la proyección simulada de los procesos dentro del terminal es el largo de fila en cada uno de estos. Este factor es evaluado en base al número máximo de pasajeros en fila obtenidos en la proyección simulada de temporada alta en los procesos. Se le otorga la puntuación completa a los procesos que muestren un número máximo promedio de pasajeros en fila menor al máximo estimado. Los procesos que muestren un número máximo promedio de pasajeros en fila mayor al máximo estimado, se penalizan con la totalidad de los puntos. La Tabla 6.23 muestra la capacidad máxima de pasajeros en fila estimada para cada proceso, el número máximo promedio de pasajeros en fila obtenido mediante la proyección simulada de la demanda en temporada alta y la puntuación asociada.

Tabla 6.23 Nivel de servicio y puntuación asignada al número de pasajeros en fila para cada proceso evaluado para la demanda estimada en temporada alta

Proceso	Capacidad máxima de pasajeros en fila	Número máximo promedio de pasajeros en fila (Simulación)	Puntuación
Registro con empleado	62	82.3	0
Entrega de Equipaje	62	45.5	1
Revisión de Seguridad	87	144.1	0

Para el proceso de registro en kioscos no se delimita un espacio para fila por lo que no se incluye este proceso en el análisis desarrollado. El espacio para fila en kioscos se evalúa tomando en consideración los ocho pies que recomienda la ACRP alrededor de la máquina o el

grupo de máquinas. Ambos grupos de seis máquinas contienen un perímetro con radio mayor a ocho pies por lo que se le otorga el punto a este proceso para este factor.

La evaluación del proceso de reclamo de equipaje sigue una distribución de tiempo de espera y tiempo de servicio diferente a los procesos analizados. Por tal razón no se logró desarrollar un modelo de simulación para este proceso. Por tales motivos no se evaluó este proceso para esta investigación.

6.2.2.2 Evaluación de dimensiones

En esta evaluación se toman en cuenta las dimensiones de los espacios provistos en los procesos del Terminal A del aeropuerto SJU. Las dimensiones tomadas se compararon con las recomendadas por las guías de diseño de terminales de la ACRP y la FAA.

Los procesos de registro de pasajeros con empleado, entrega de equipaje y revisión de seguridad muestran espacios para fila similares por lo que la ACRP recomienda seguir las mismas recomendaciones de espacio para estos procesos. En la Tabla 6.24 se muestran las dimensiones mínimas y recomendadas para cada uno de los espacios evaluados para los procesos mencionados. El primer espacio evaluado es la distancia disponible entre el mostrador y el comienzo del área para fila. Esta evaluación no aplica para el proceso de revisión de seguridad ya que los pasajeros no deben cargar equipaje pesado en esta área. Además, se evalúa el espacio provisto para contener la fila cuya forma de serpentina representa la mayoría de los casos en terminales de aeropuertos. El ancho de los segmentos rectos y ancho de virajes en las serpentinadas de los distintos procesos fueron medidos y se utilizaron las medidas más restrictivas de ambos elementos para ser evaluados en contraste con los valores recomendados por la ACRP.

Tabla 6.24 Dimensiones recomendadas por la ACRP y dimensiones medidas para los procesos en el Terminal A del aeropuerto SJU

Espacio	Dimensiones ACRP		Dimensiones Medidas (pies)		
	Mínimo (pies)	Recomendado (pies)	Registro con empleado	Entrega Equipaje	Revisión Equipaje
Mostrador a fila	8	10	11.3	11.3	N/A
Serpentina	15	15-25	24.7	30.4	44.4
Ancho de segmento recto en serpentina	4.5	4.5-5	4.5	4.9	5.1
Ancho de viraje en serpentina	5	5	4.5	4.1	2.5
Ancho de área de procesamiento	26	26-29	N/A	N/A	23

El área de seguridad muestra una medida de ancho de área de procesamiento, la cual se estima debe estar entre 26 y 29 pies para la configuración de dos líneas de revisión de equipaje para un detector de metales y un rastreador por imagen de cuerpo entero. Estas medidas brindan el espacio necesario para proveer un nivel de servicio satisfactorio. En total se evalúan cuatro espacios para cada uno de los tres procesos evaluados por lo que se divide el máximo de 1 punto entre cuatro para obtener 0.25 puntos por cada espacio. Siguiendo esta distribución se muestra la puntuación obtenida por cada proceso en la Tabla 6.25.

Tabla 6.25 Puntuación obtenida para los espacios de los procesos de registro con empleado, entrega de equipaje y revisión de seguridad

Espacio	Registro con empleado	Entrega de equipaje	Revisión de seguridad
Mostrador a fila	0.25	0.25	N/A
Serpentina	0.25	0.25	0.25
Ancho de segmento recto en serpentina	0.25	0.25	0.25
Ancho de viraje en serpentina	0	0	0
Ancho de área de procesamiento	N/A	N/A	0
Total	0.75	0.75	0.5

La ACRP recomienda un espacio de ocho pies en frente de las máquinas de autoregistro. Este es el único requisito para el área donde se encuentran los kioscos y este es cumplido por el Terminal A ofreciendo un espacio de 54 pies entre dos filas de seis máquinas de autoregistro.

El proceso de reclamo de equipaje muestra dimensiones diferentes en los espacios recomendados debido a su función. Aunque la evaluación de este proceso no se incluye en este caso, se muestra el procedimiento llevado a cabo para evaluar las dimensiones del reclamo de equipaje en el aeropuerto SJU. La Figura 6.13 muestra las dimensiones recomendadas por la ACRP para el sistema de reclamo de equipaje utilizado en el terminal A.

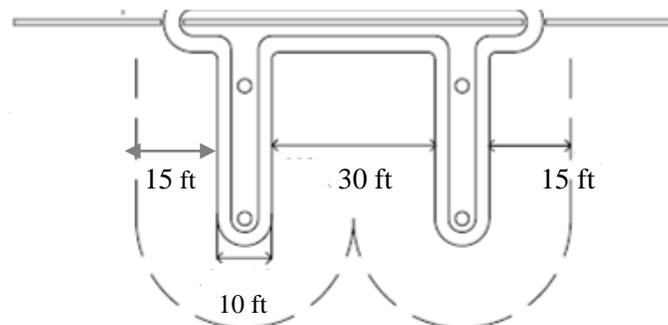


Figura 6.13 Dimensiones recomendadas por la ACRP para el sistema de reclamo de equipaje utilizado en el Terminal A del aeropuerto SJU (ACRP,2010)

Las dimensiones mostradas en la figura 6.13 recomiendan un radio mínimo de 15 pies alrededor de la correa y 10 pies de diámetro en la curva de las correas. Además, una razón máxima de 1.5 de largo por cada uno de ancho. Cada medida mostrada en la Figura 6.13 representa 0.20 puntos, mientras que la relación de largo por ancho obtiene el restante 0.20 del punto asignado a la evaluación de las dimensiones en el proceso de reclamo de equipaje. El Terminal A cuenta con 4 correas. Las correas 1 y 4 son exactamente iguales que las correas 2 y 3. Todas las correas muestran las mismas dimensiones para los espacios disponibles. La única diferencia entre los grupos de correas es la razón de largo por ancho. Las correas 1 y 4 tienen medidas de 65 pies de ancho por 29.3 pies de ancho mientras que las correas 2 y 3 muestran medidas de 50.8 pies de ancho por 29.3 pies de ancho. La razón de largo por ancho es de 2.2 y 1.7 para los grupos de correas 1,4 y 2,3 respectivamente. Estas dimensiones no cumplen con la razón máxima de largo por ancho recomendada por lo que se penalizó al proceso por el valor de este factor. Las dimensiones de los espacios disponibles para las cuatro correas se muestran en la Figura 6.14.

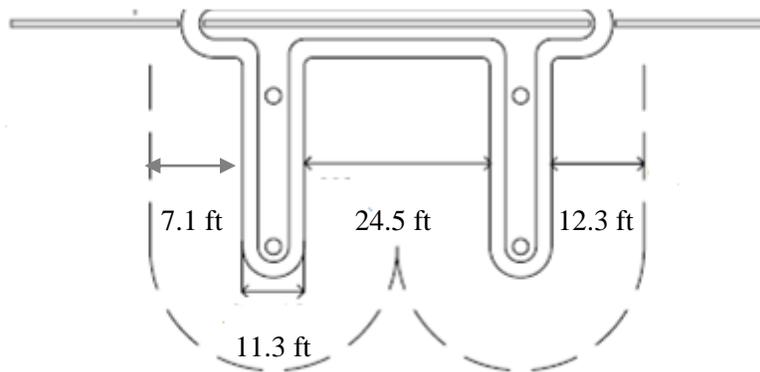


Figura 6.14 Dimensiones medidas del sistema de reclamo de equipaje utilizado en el terminal A del aeropuerto SJU

Los resultados muestran que las dimensiones de las correas de reclamo de equipaje sólo cumplen con la distancia recomendada para la zona libre de obstáculos desde las correas a uno de los lados y el diámetro de curva en la correa. La evaluación de este elemento resulta en una puntuación de 0.4 del máximo de un punto asignado a las dimensiones de los procesamientos de pasajeros en el terminal.

6.2.3 *Evaluación de Influencias Adicionales del Terminal*

Durante la toma de datos en el Terminal A del aeropuerto SJU se analizaron también las influencias adicionales que afectan la operación del terminal. En las próximas secciones se detallan los hallazgos y evaluaciones pertinentes.

6.2.3.1 Evaluación de dispositivos de información

Los dispositivos informativos utilizados en el Terminal A del aeropuerto SJU no cumplen con todas las características establecidas en la metodología. Según la metodología, estos dispositivos deben ser conspicuos, concisos, comprensibles, legibles y estar bien localizados. Algunos de los incumplimientos que pudimos notar durante la toma de datos en el aeropuerto es la cantidad de preguntas que nos hacían los turistas en relación a la ubicación de diferentes áreas. Esto demuestra una falla en el sistema de rotulación del terminal. Alguna complejidad del terminal es la ubicación de las salidas 1 y 2 con respecto al puesto de revisión de seguridad. Los pasajeros se confunden bastante debido a que saliendo del puesto de revisión de seguridad debe hacerse un giro en dirección contraria para alcanzar las salidas. Además de esto, las salidas están bastantes retiradas del puesto de revisión de seguridad lo cual causa que los pasajeros se sientan perdidos luego de caminar varios pies de distancia.

La ubicación de las pantallas de información, sin el espacio necesario para permitir el flujo de personas, puede ocasionar que los pasajeros o cualquier persona interesada en obtener información obstruya el paso y se afecte la operación del terminal. Esto sucede sólo con la ubicación de una pantalla de información en el Terminal A. Esta se encuentra ubicada en el pasillo que da acceso a las salidas 1 y 2 del terminal. El pasillo tiene un ancho de solo 14.5 pies frente a la pantalla informativa por donde transitan pasajeros, empleados y vehículos pequeños para el transporte de pasajeros. Uno o varios pasajeros estacionados, observando la pantalla de información, ocasionan que el flujo de pasajeros se afecte y que el vehículo tenga que detenerse a esperar que estos despejen el área.

Las características que más se ven afectadas en el diseño del sistema informativo del Terminal A del aeropuerto SJU son la comprensibilidad, conspicuidad y localización. Es obvio que si los pasajeros se encuentran perdidos en la búsqueda de sus salidas o cualquier otro destino, el mensaje de los rótulos no está llegando correctamente. Se decidió restar puntos a estas características como penalización por no cumplir con su ejecución. La Tabla 6.26 muestra los resultados de la evaluación.

Tabla 6.26 Evaluación de características de dispositivos de información

Característica	Puntos
Conspicuo	0.5/1
Conciso	1/1
Comprensible	0.5/1
Legible	1/1
Localización	0/1
Total	3/5

6.2.3.2 Evaluación de espacios para fila y circulación de pasajeros

El espacio necesario para realizar las filas de abordaje y permitir el flujo cómodo y sin obstrucciones a los pasajeros es evaluado mediante las dimensiones recomendadas por la ACRP, mostradas en la figuras 5.7 y 5.8. Los espacios recomendados para diferentes elementos y los espacios medidos en el Terminal A del aeropuerto SJU se muestran en la Tabla 6.27. Siguiendo la metodología desarrollada, el Terminal A debe proveer al menos 20 pies para el pasillo de circulación ya que solo posee salidas a un lado del pasillo.

Tabla 6.27 Dimensiones recomendadas para salidas de terminales y dimensiones medidas en el Terminal A del aeropuerto SJU

Distancia (pies)	Recomendado (pies)	Número de Salida en Terminal A						
		1	2	3	4	5	6	7
Profundidad de área de espera	25-30	61.5	61.5	47.8	48.2	48.5	48.3	37.5
Ancho pasillo de abordaje	6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Profundidad de mostrador	15	47.5	47.5	12	41.3	41.3	39.7	24.5
Ancho de pasillo disponible para circulación	20	24.6	24.6	25	29.3	25	24.3	23.7

*Los valores en negrilla no cumplen con el mínimo recomendado

La evaluación fue realizada distribuyendo equitativamente las puntuaciones entre el número de salidas del terminal. Se penalizó el terminal por cada recomendación no cumplida (marcadas en negrillas). Dividiendo los cinco puntos de la evaluación entre las características de las salidas evaluadas, este factor recibe 3.57.

6.2.3.3 Evaluación de número de asientos y área de espera por salida

Las salidas del Terminal A del aeropuerto SJU son utilizadas por aviones tipo Airbus 320 (A320) y Embraer 190 (E90) con capacidades de 150 y 100 pasajeros respectivamente. En la Tabla 6.28 se muestran los resultados de la evaluación de este factor. El área por pasajero se

calcula en base a la capacidad del avión de mayor envergadura que utiliza la salida. Las salidas 1 y 2 comparten el área de espera por lo que en esta parte se analizan como una sola salida.

Tabla 6.28 Número de asientos y área de espera por salida del Terminal A en el aeropuerto SJU

Salida	Capacidad de avión	Número de asientos	Porcentaje	Área de espera (pies ²)	Área por pasajero (pies ²)
1	150	160	> 90%	55x106	19.4
2	150	160	> 90%		
3	150	124	83%	48x53	17
4	150	156	> 90%	48x47	15
5	150	160	> 90%	48x47	15
6	150	156	> 90%	49x49	16
7	150	112	75%	30x74	14.8

La evaluación fue realizada distribuyendo equitativamente las puntuaciones entre el número de salidas del terminal y ambas características evaluadas. Se penalizó el terminal por el nivel de servicio que muestren las dimensiones, según las escalas mostradas en la Tabla 5.12. Dividiendo los cinco puntos de la evaluación entre las características de las salidas evaluadas, este factor recibe 4.7 puntos.

6.3 Evaluación de Zona Aérea

En esta sección se evalúa la zona aérea del aeropuerto SJU utilizando la metodología desarrollada como guía. La Tabla 6.29 muestra los resultados de la evaluación para cada factor y categoría con su respectiva puntuación.

Tabla 6.29 Resultados de evaluación de zona aérea del aeropuerto SJU

Área de Evaluación	Peso por relevancia a la Infraestructura y Operación de un aeropuerto			
	Zona	Categoría	Factor	Puntos
	Peso	Peso	Peso	(0-5)
3. Zona Aérea	32.7/45%	72.7/100%		
3.1 Configuración y Geometría		42.7/50%	85.3/100%	
a) Capacidad de pistas			35/35%	5/5
b) Geometría de pista			11.3/15%	3.75/5
c) Configuración y geometría de salidas de pista			18/20%	4.5/5
d) Configuración y geometría de calles de rodaje			13.5/15%	4.5/5
e) Áreas de almacenamiento temporero			7.5/15%	2.5/5
3.2 Tiempos de ocupación		30/50%	60/100%	
f) Tiempo de ocupación de pista			16/40%	2/5
g) Tiempo de ocupación de calles de rodaje			20/20%	5/5
h) Tiempo de ocupación de plataforma			24/40%	3/5

6.3.1 Configuración y Geometría del Aeropuerto SJU

La evaluación de la configuración y geometría del aeropuerto SJU se compone de la capacidad y geometría de sus pistas, configuración y geometría de salidas de pista y calles de rodaje y de las áreas de almacenamiento temporero. En la siguiente sección se evalúan cada uno de estos factores.

6.3.1.1 Capacidad de pistas

El aeropuerto SJU cuenta con dos pistas orientadas en forma de V abierta con un ángulo de separación entre estas de aproximadamente 23 grados. Según la Tabla 5.14, para operaciones en dirección contraria a la V, como se utilizan las pistas del aeropuerto SJU, se obtienen capacidades teóricas de entre 60-180 y 50-80 en VFR e IFR, respectivamente. Operaciones en dirección contraria a la V maximizan la capacidad de las pistas en comparación con la utilización de estas en dirección a la V (50-100 y 50-60 operaciones por hora para VFR e IFR, respectivamente, para operaciones en dirección a la V), (Vásquez et al., 2011).

Tabla 6.30 Total de operaciones por mes para el año fiscal 2011 en el aeropuerto internacional Luis Muñoz Marín (Autoridad de los Puertos de Puerto Rico, 2011)

Mes	Movimiento de Pasajeros			Movimiento de Carga		
	Vuelos Aterrizando	Vuelos Despegando	Total	Vuelos Aterrizando	Vuelos Despegando	Total
Julio	4,882	4,874	9,756	2,342	2,337	4,679
Agosto	4,542	4,542	9,084	2,208	2,209	4,417
Septiembre	4,310	4,309	8,619	1,758	1,757	3,515
Octubre	3,703	3,703	7,406	1,839	1,839	3,678
Noviembre	4,157	4,157	8,314	1,888	1,888	3,776
Diciembre	4,651	4,651	9,302	2,219	2,219	4,438
Enero	4,954	4,956	9,910	2,213	2,213	4,426
Febrero	4,532	4,531	9,063	1,999	1,999	3,998
Marzo	5,011	5,007	10,018	2,332	2,332	4,664
Abril	4,815	4,813	9,628	2,114	2,114	4,228
Mayo	4,383	4,380	8,763	2,063	2,063	4,126
Junio	4,473	4,473	8,946	2,201	2,201	4,402
Total	54,413	54,396	108,809	25,176	25,171	50,347
Porcentaje	50%	50%	100%	50%	50%	100%

El promedio de operaciones en el aeropuerto SJU es de 21,783 operaciones entre los años del 2008 al 2011 (BTS, 2012). Sin embargo, este número de operaciones es solo de las aerolíneas que reportan sus estadísticas a la BTS. El número de operaciones por mes para el año fiscal 2011

(julio 2010 a junio 2011) se muestra en la Tabla 6.30. El total de operaciones, incluyendo operaciones comerciales y operaciones de carga, fue de 159,156 para el año fiscal 2011. Este ha sido el número de operaciones más bajo en los últimos años para el aeropuerto SJU. Se espera que el número de operaciones aumente para el año fiscal 2012 debido a la apertura del Terminal A en el aeropuerto.

Mediante el nivel 1 de determinación de capacidad descrito en la metodología, se utilizan las tablas desarrolladas por la FAA (1983) para determinar la capacidad a hora pico y el ASV del aeropuerto SJU. Según el plan maestro del aeropuerto SJU, el aeropuerto presentaba un índice de mezcla de 121 para el año 1995. Asumiendo un aumento en el índice de mezcla de los aviones del aeropuerto SJU se proyectaron los índices de mezcla mostrados en la Tabla 6.31.

Tabla 6.31 Índices de mezcla del aeropuerto SJU

Año	Mezcla operacional de aviones			Índice de mezcla
	S y T	L	H	L +3H
1995	41%	28%	31%	121
2000	36%	29%	35%	134
2005	33%	30%	37%	141
2010	32%	30%	38%	144
2015	29%	30%	41%	153

El índice de mezcla es obtenido interpolando entre las proyecciones al 2010 y el 2015 para el año 2011. El índice de mezcla para el año 2011 resultó en 146. Para este índice de mezcla y la configuración de las pistas en el aeropuerto SJU, las tablas de la FAA (1983) estiman una capacidad horaria de 73 operaciones para la condición VFR y 60 operaciones para la condición IFR. El ASV estimado para estos datos es de 265,000 operaciones por año.

La razón de demanda para este caso resulta en 0.6. Esta razón de demanda representa un nivel de servicio excelente en la escala desarrollada ya que el aeropuerto debe operar con una demora promedio por avión menor a un minuto (Figura 5.12) y por lo tanto obtiene el máximo de cinco puntos en el factor evaluado.

6.3.1.2 Evaluación de Geometría de pistas

El aeropuerto SJU se diseña en base al código de referencia D-V. Esta clasificación implica una velocidad de aproximación de las naves de entre 141-166 nudos y una nave de diseño entre Boeing 747, 777 o 787 y Airbus 330 o 340 con ancho de entre 171 y 214 pies.

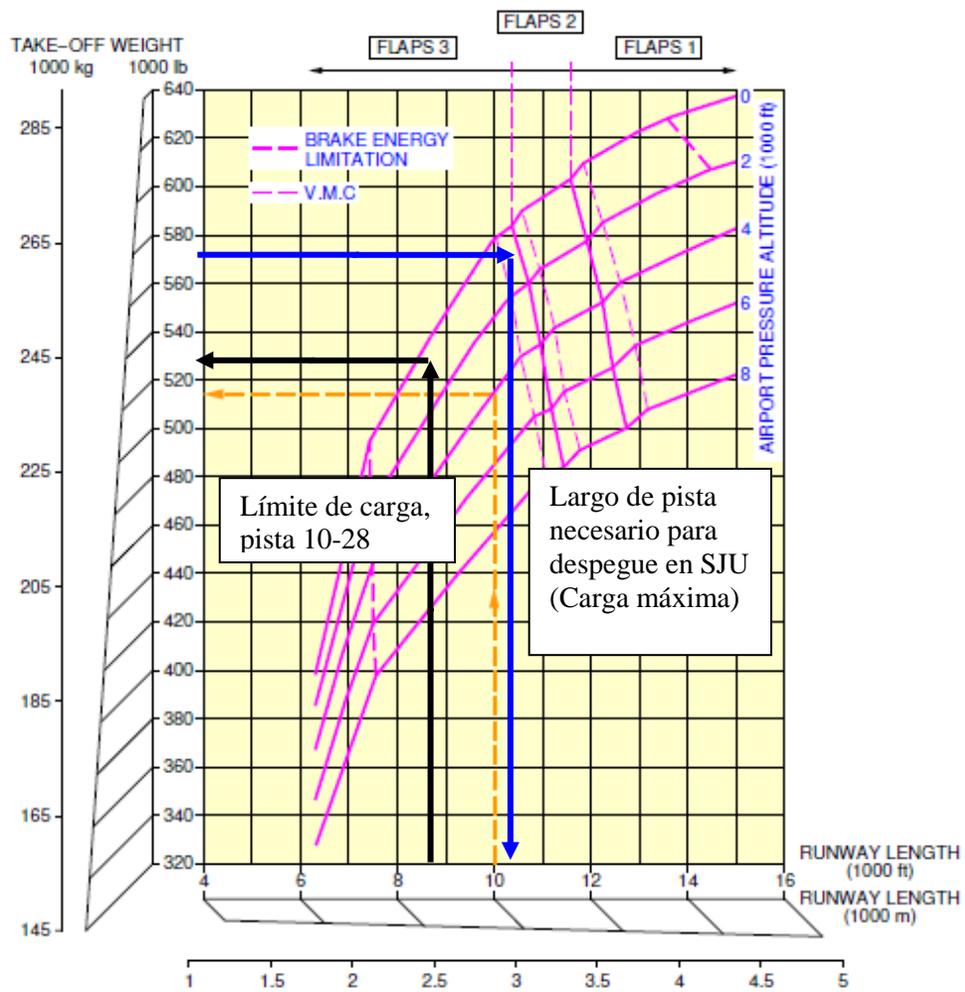
Actualmente el avión de mayor envergadura utilizando el aeropuerto SJU, en más de 500 operaciones al año, es el A340-200, el cual llega al aeropuerto tres veces por semana. Este avión

tiene dimensiones de 198 pies de ancho y 195 pies de largo aproximadamente, lo cual cumple con el largo máximo permitido para la clasificación del aeropuerto SJU. El largo de pista necesario para que un avión aterrice o despegue depende de varios factores, entre ellos la altura de la pista sobre el nivel del mar, clima y viento cruzado, entre otros. Las Figuras 6.15 y 6.16 muestran las curvas de largo de pista necesario para el despegue y aterrizaje de un Airbus 340-200 variando el peso del avión y la altura de la pista respecto al nivel del mar. El Airbus 340-200 puede cargar hasta 573,200 libras en despegue y no debe llevar más de 399,037 libras en el aterrizaje (Airbus, 1992).

Según la Figura 6.15, el largo de pista requerido para el despegue de un avión A340-200, cargado a su máxima capacidad para despegue, en el aeropuerto SJU es de alrededor de 9,800 pies. La elevación y temperaturas en el aeropuerto SJU permiten que un avión Airbus 340-200 pueda despegar con su máximo peso de despegue sólo en la pista 8-26 (10,000 pies de largo). Para la pista 10-28 (8,000 pies de largo) este avión podría realizar el despegue con menor carga como se muestra en la Figura 6.15. Sin embargo, el largo de pista requerido para el aterrizaje de un avión A340-200 con su máxima carga de aterrizaje en el aeropuerto SJU es de 6,000 pies, lo cual cualifica a ambas pistas para el aterrizaje de este tipo de avión.

El aeropuerto SJU utiliza la pista 8-26 para despegues y la pista 10-28 para aterrizajes. En base a esta asignación de operaciones y el análisis de largo de pista requerido, el aeropuerto permite de forma cómoda y segura la operación de un avión Airbus 340-200 como lo hace en la actualidad. Sin embargo, el cierre de operaciones en la pista 8-26 provocaría un contratiempo al momento del despegue de la nave Airbus 340-200 en el aeropuerto. Esta situación puede ocurrir en un futuro cercano, cuando la administración del aeropuerto cierre la pista 8-26 por varios días o hasta meses debido a la ejecución de un proyecto de mejoras llevado a cabo en la pista.

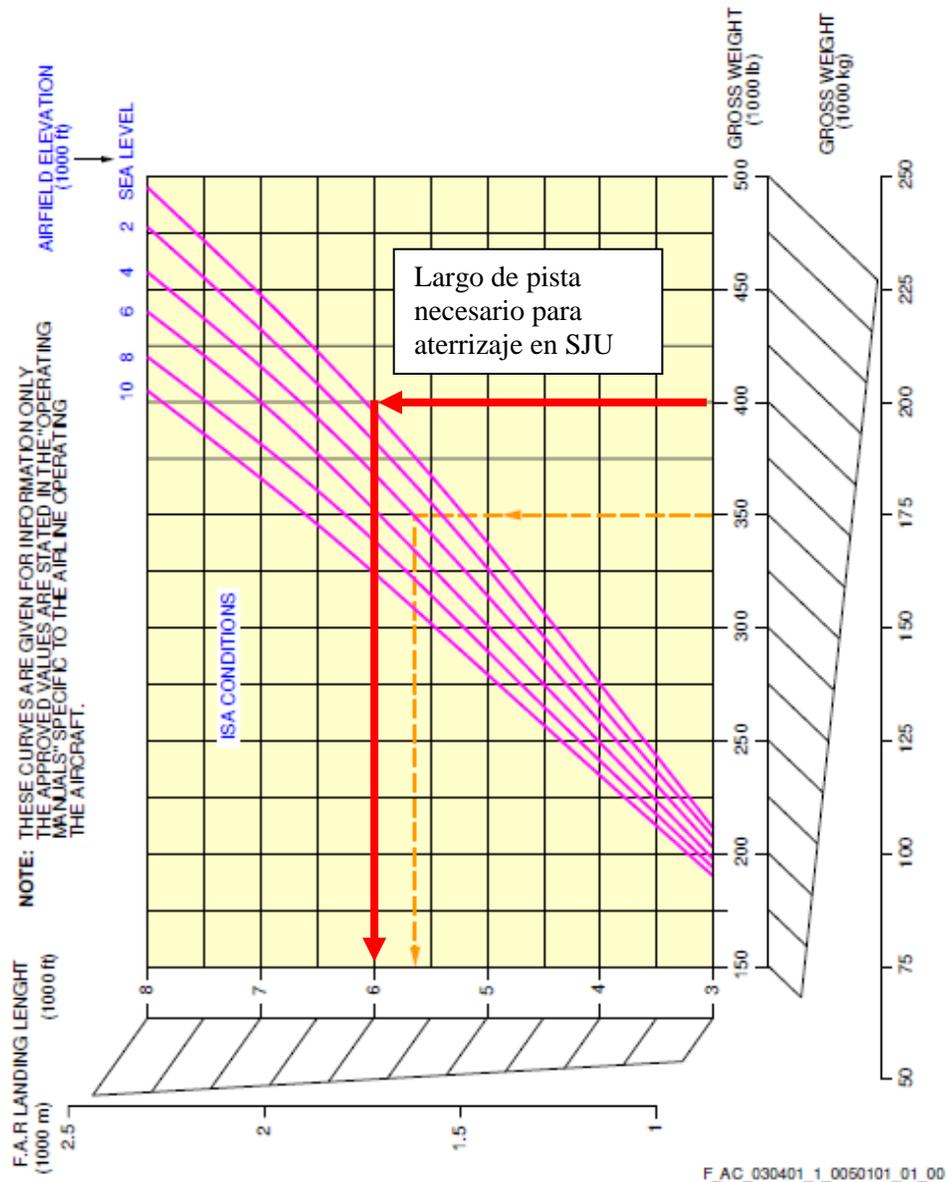
La Figura 6.16 muestra la velocidad de aproximación del avión Airbus 340-200 en base al peso bruto de la nave. El peso bruto de la aeronave (también conocido como el peso de todo a bordo) es el peso total de la aeronave en cualquier momento durante la operación de vuelo o de tierra. El peso bruto de la aeronave disminuye durante el vuelo debido al consumo de combustible y aceite. El peso bruto de la aeronave también puede variar durante el vuelo debido a la caída de carga útil o de reabastecimiento de combustible en vuelo. En el momento de liberación del freno, el peso bruto es igual al peso de despegue. Durante el vuelo, el peso bruto se conoce como el peso en ruta o el peso de vuelo.



F_AC_030302_1_0050101_01_00

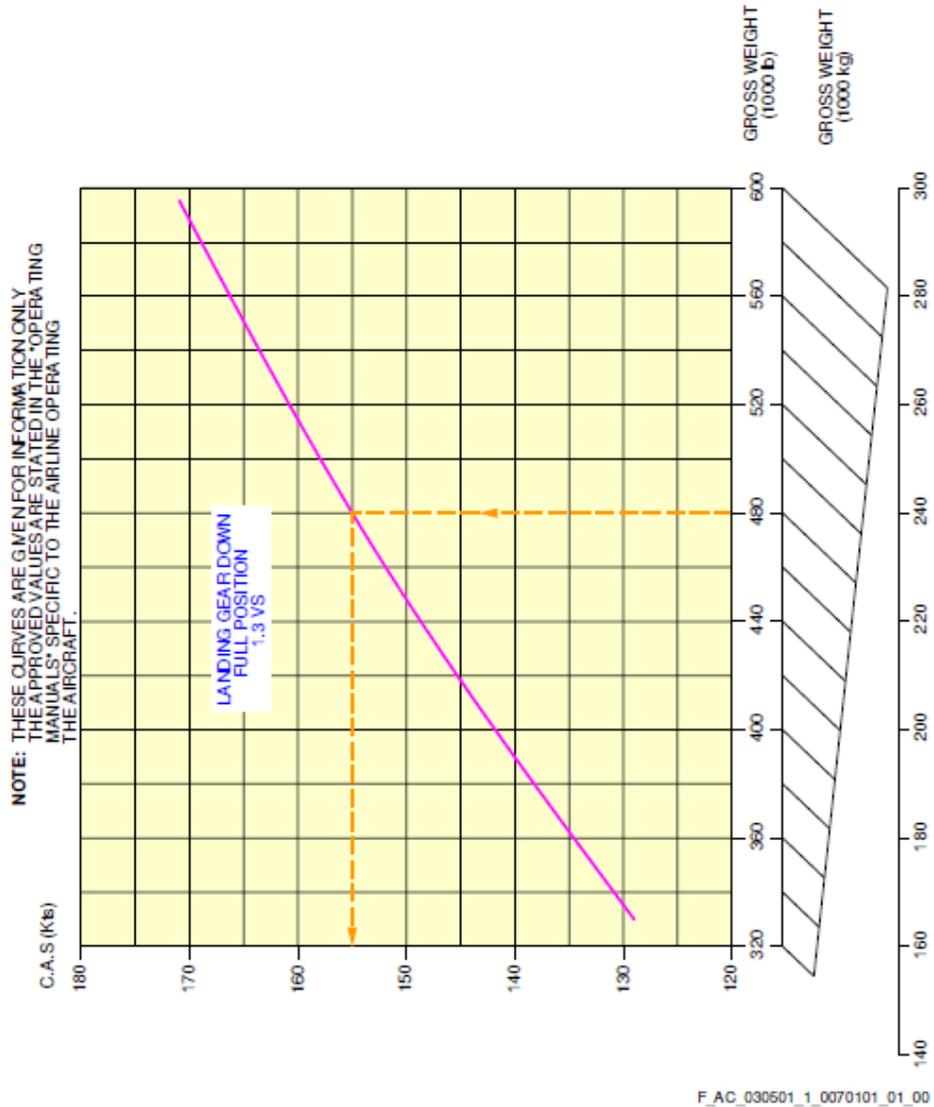
FAR / JAR Takeoff Weight Limitation
 ISA +15° C (ISA +27° F) Conditions - CFM56-5C2 engine
 FIGURE-3-3-2-991-005-A01

Figura 6.15 Largo de pista requerido para el despegue de un avión Airbus 340-200 en el aeropuerto SJU (Airbus, 1992)



FAR / JAR Landing Field Length
 ISA Conditions – CFM56-5C2 engine
 FIGURE-3-4-1-991-005-A01

Figura 6.16 Largo de pista requerido para el aterrizaje de un avión Airbus 340-200 en el aeropuerto SJU (Airbus, 1992)



Final Approach Speed
CFM56-5C2 engine
FIGURE-3-5-1-991-007-A01

Figura 6.17 Velocidad de aproximación del avión Airbus 340-200 en base al peso bruto (Airbus, 1992)

Para determinar la velocidad de aproximación del avión se asume un peso bruto promedio de 486,000 libras. La velocidad de aproximación para la nave con un peso bruto de 486,000 es de 155 nudos (Figura 6.17). La velocidad resultante cae dentro del rango aceptable de velocidades de aproximación para la clasificación del aeropuerto SJU (desde 141 hasta menos de 166 nudos para un aeropuerto clasificación D-V).

Basado en la asignación de puntos descrita en la metodología, el aeropuerto SJU obtiene 1.25 puntos menos del total, debido al incumplimiento de la pista 10-28 con el largo de pista

requerido para el despegue de una nave A340-200 con su peso máximo. Los demás factores cumplen con los parámetros requeridos para el avión de mayor envergadura tomado en consideración por lo que el aeropuerto SJU obtiene 3.75 del máximo de cinco puntos utilizado para las evaluaciones.

6.3.1.3 Evaluación de configuración y geometría de salidas de pista

El modelo de nivel 2 (descrito en la sección 5.2.1.1) desarrollado por la FAA para determinar la capacidad aérea de un aeropuerto penaliza la capacidad de las pistas por el número y la ubicación específica de salidas a lo largo de la pista. Para calcular esta variable se utilizó el índice de mezcla, el número de salidas de pista, la separación entre salidas y el porcentaje de llegadas que muestra el aeropuerto.

La pista 10-28 del aeropuerto SJU está conectada a las calles de rodaje mediante 12 salidas. Cinco de éstas brindan acceso a la sección sur del aeropuerto (aviación general y carga) y las restantes siete a la sección al norte del aeropuerto. Dos de las salidas ubicadas al norte de la pista son salidas angulares a 30 grados (de alta velocidad). La pista 8-26 se conecta a las calles de rodaje mediante ocho salidas de las cuales cuatro intersecan la pista en forma perpendicular y cuatro en forma angular para permitir maniobras a alta velocidad. En el aeropuerto SJU se utiliza comúnmente la pista 10-28 para aterrizajes y la pista 8-26 para despegues. Sin embargo, se evalúan ambas pistas ya que en caso de cierre de una de las pistas se debe utilizar la pista en funcionamiento para ambas operaciones.

La pista 10-28 brinda acceso al edificio terminal, hacia el norte del aeropuerto, aunque ofrece salidas hacia el sur de la pista para el uso de operaciones de carga y militares. Sin embargo, no se consideran para esta evaluación las salidas al sur de la pista ya que el número de operaciones hacia esta zona es despreciable. Al norte de la pista se encuentran tres salidas perpendiculares a 1,800, 6,300 y 7,900 pies del umbral de la pista y dos salidas angulares a 4,000 y 5,100 pies del umbral de la pista. Todas las medidas fueron tomadas en dirección de la V abierta, desde el comienzo del umbral de la pista hasta el centro de las salidas, por medio de un plano digital.

La pista 8-26 por su parte solo contiene salidas al ala sur del aeropuerto donde se encuentran ubicados los destinos. La pista contiene dos salidas perpendiculares a 7,400 y 7,750 pies del umbral de la pista y tres salidas angulares a 3,200 y 4,500 y 5,600 pies del umbral de la

pista. Las medidas igualmente tomadas desde el comienzo del umbral de la pista hasta el centro de las salidas por medio de un plano digital.

Utilizando la configuración de las pistas y el ángulo formado entre estas para determinar las tablas que deben utilizarse en este caso, se obtienen los resultados para las condiciones VFR e IFR. En las tablas se utiliza el índice de mezcla, el porcentaje de llegadas y la ubicación de las salidas para determinar el coeficiente (E) que afecta la fórmula de capacidad del aeropuerto.

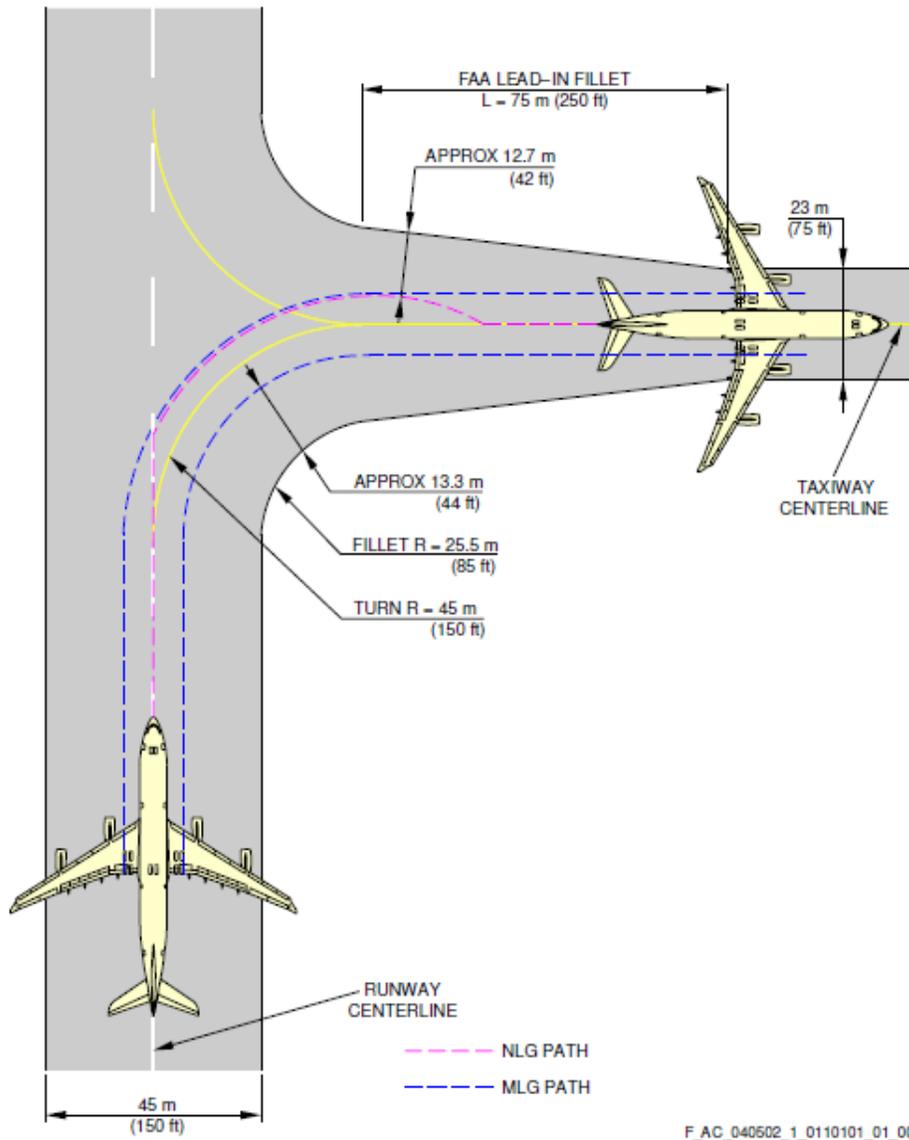
En el caso del aeropuerto SJU, se utiliza sólo la condición VFR, ya que esta condición se mantiene el 99.4% del tiempo (PRPA, 1995). Para la configuración en V abierta con operaciones en dirección divergente de la V y un ángulo entre pistas entre 15 y 90 grados, se recomienda utilizar la tabla 3-6 para determinar la capacidad horaria y ASV del aeropuerto en la condición VRF.

Utilizando el índice de mezcla de 146 obtenido en la sección 6.3.1.1 y un porcentaje de llegadas de 50% de la Tablas 6.32, se obtiene el coeficiente (E) asociado a las pistas del aeropuerto SJU. Para las salidas evaluadas de la pista 10-28, el coeficiente resultó ser 0.93 mientras que el coeficiente para las salidas de la pista 8-26 resulta ser 0.97. Estos coeficientes obtienen una puntuación de 2 y 3 respectivamente para cada pista. En promedio esta calificación resulta en 2.5 de la puntuación máxima posible de 3. Los dos puntos restantes se asignan a las pistas por proveer salidas de alta velocidad para disminuir el tiempo de ocupación de las naves. Se le añaden los dos puntos de estos elementos a la evaluación de las salidas de pista para completar el total de 4.5 puntos del máximo de cinco asociado a la evaluación de factores.

6.3.1.4 Configuración y geometría de calles de rodaje

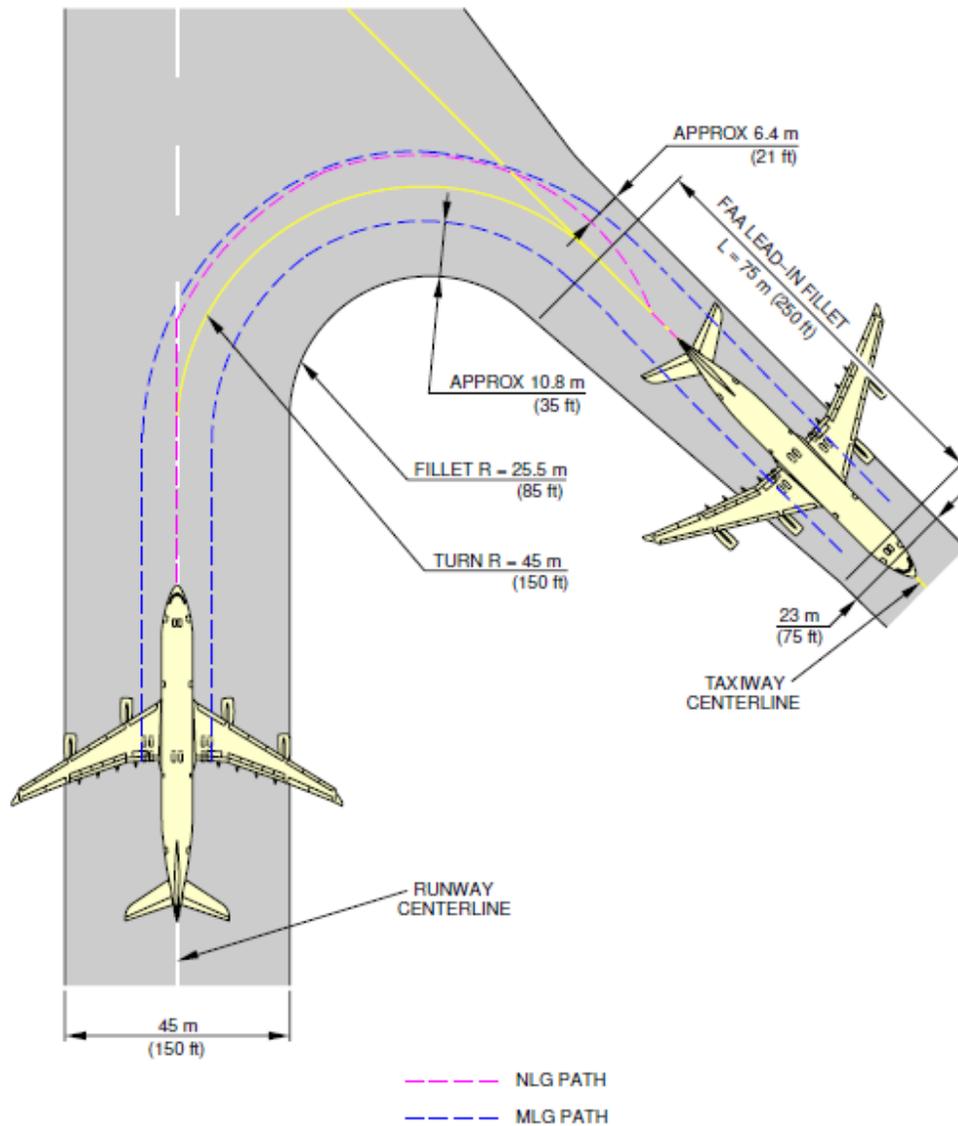
Según se menciona en la descripción del aeropuerto SJU (Sección 2.4.2), la pista 8-26 contiene una calle de rodaje paralela parcial mientras que la calle de rodaje paralela a la pista 10-28 cubre la totalidad de la pista. Es por esta razón que la pista 8-26 sólo recibe un punto mientras que la pista 10-28 recibe los dos puntos asignados a este elemento (Tabla 5.22). El promedio de esta puntuación resulta en 1.5 puntos para este elemento. Por otro lado, ninguna de las calles de rodaje en el aeropuerto SJU cruza una pista activa por lo que se otorgan los dos puntos asignados a esta característica.

Las Figuras 6.18, 6.19, 6.20 muestran el radio mínimo necesario para que el avión de mayor envergadura que utiliza el aeropuerto actualmente (A340-200) pueda realizar giros a distintos ángulos desde las pistas o calles de rodaje.



90° Turn - Runway to Taxiway
Judgement Oversteering Method
FIGURE-4-5-2-991-011-A01

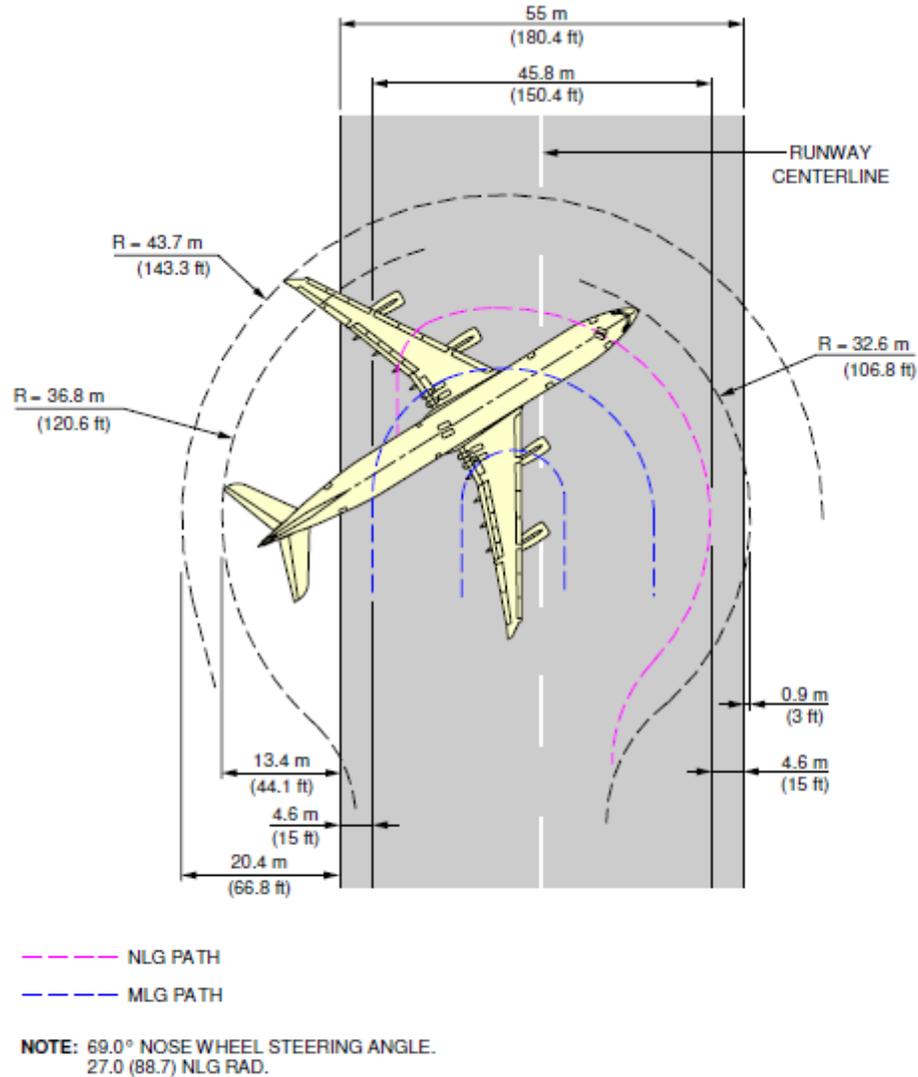
Figura 6.18 Radio mínimo necesario para un giro de 90 grados de un avión A340-200 desde una pista de 150 pies de ancho hasta una calle de rodaje de 75 pies de ancho (Airbus, 1992)



F_AC_040501_1_0090101_01_00

135° Turn - Runway to Taxiway
Judgemental Oversteering Method
FIGURE-4-5-1-991-009-A01

Figura 6.19 Radio mínimo necesario para un giro de 135 grados de un avión A340-200 desde una pista de 150 pies de ancho hasta una calle de rodaje de 75 pies de ancho (Airbus, 1992)



F_AC_040503_1_0070101_01_01

180° Turn on a Runway
 180° Turn on a 194 ft Wide Runway
 FIGURE-4-5-3-991-007-A01

Figura 6.20 Radio mínimo necesario para un giro de 180 grados de un avión A340-200 en una pista de 150 pies de ancho (Airbus, 1992)

En las calles de rodaje del aeropuerto SJU el giro más común es el de 90 grados, aunque los aviones también necesitan hacer giros a distintos ángulos para llegar a su destino. Por ejemplo, un avión de fuselaje ancho que aterrice en la pista 10-28 (pista utilizada para aterrizajes) dependiendo del largo de pista que utilice tomará una de las dos últimas salidas (salidas F ó G). Estas salidas tienen un ángulo de conexión con las calles de rodaje de 90 grados con la excepción de la salida F la cual permite adicionalmente un viraje de 180 grados en

dirección al terminal A. Desde este punto los giros restantes para los destinos más comunes en el aeropuerto son de 90 grados. El trayecto desde las salidas de los aviones hasta la pista 8-26, al igual que el trayecto desde la pista 10-28, se compone de giros de 90 y 180 grados.

Las calles de rodaje del aeropuerto SJU permiten giros de 90, 150 y hasta 180 grados. Los giros de 150 grados se obtienen cuando un avión que aterriza toma una de las salidas de alta velocidad (30 grados) y luego realiza un viraje hacia la calle de rodaje paralela a la pista. Esta maniobra no es posible para aviones de fuselaje ancho debido a que estas salidas se ubican en el área central de la pista y por lo tanto no deben cumplir con el radio de viraje para este tipo de aviones.

Se utilizó un plano digital del aeropuerto para medir el ancho y aproximar el radio de curva de los distintos virajes en las calles de rodaje del aeropuerto SJU. Las medidas realizadas resultaron ser mayores a los mínimos requeridos para el tráfico de un avión A340-200. Por lo tanto, se otorga el punto asignado a las dimensiones de calles de rodaje del aeropuerto SJU.

En total las calles de rodaje obtienen, 1.5 puntos por la extensión de la calle de rodaje paralela a cada una de las pistas, dos puntos porque las calles de rodaje no cruzan una pista activa y un punto por cumplir con las dimensiones requeridas para el avión de mayor fuselaje que utiliza el aeropuerto. En total este elemento de la zona aérea del aeropuerto SJU obtiene 4.5 del máximo de cinco asignados a la evaluación de estos factores.

6.3.1.5 Áreas de almacenamiento temporero

El aeropuerto SJU es un aeropuerto de mediana capacidad, el cual muestra periodos de congestión en las horas pico de un día de alta demanda. Por esta razón se considera necesario el uso de áreas de almacenamiento para no obstruir el tráfico aéreo en situaciones donde una nave no pueda despejar las calles de rodaje. El aeropuerto SJU utiliza sus pistas tanto para despegue como para aterrizaje, esto dependiendo en muchas ocasiones del piloto que maneje el avión. Por esta razón se considera necesario proveer áreas de almacenamiento para despegue y aterrizaje en ambas pistas.

La pista 8-26, al igual que la pista 10-28, posee una calle de rodaje paralela a ésta, capaz de acomodar dos aviones de fuselaje ancho manteniendo disponibilidad para el paso de aviones que tengan permiso de despegue. El plan maestro del aeropuerto SJU menciona la construcción de nuevos *holding aprons* al final de las pistas 8-26 y 10-28 pero el documento no especifica la localización exacta ni la capacidad de estas áreas. Por tal razón se denomina como *holding apron*

el área utilizada actualmente para retener las naves que esperan por la disponibilidad de una puerta de desembarque o estacionamiento. En la Figura 6.21 se muestra la localización de estas áreas para cada una de las pistas del aeropuerto SJU.

Aunque las áreas de almacenamiento temporero están presentes en las pistas del aeropuerto SJU, no se encuentran en todas las operaciones donde son necesarias. La pista 8-26 no contiene un área de almacenaje, mientras que el área de almacenaje en operaciones de aterrizaje para la pista 10-28 es una improvisada ya que obstruye un área de plataforma existente. Sin, embargo todas las áreas presentes permiten almacenar dos de los aviones de mayor fuselaje que utiliza el aeropuerto. Usando la Tabla 5.24, se otorgan 2.5 puntos a las áreas de almacenamiento temporero de la zona aérea del aeropuerto SJU.

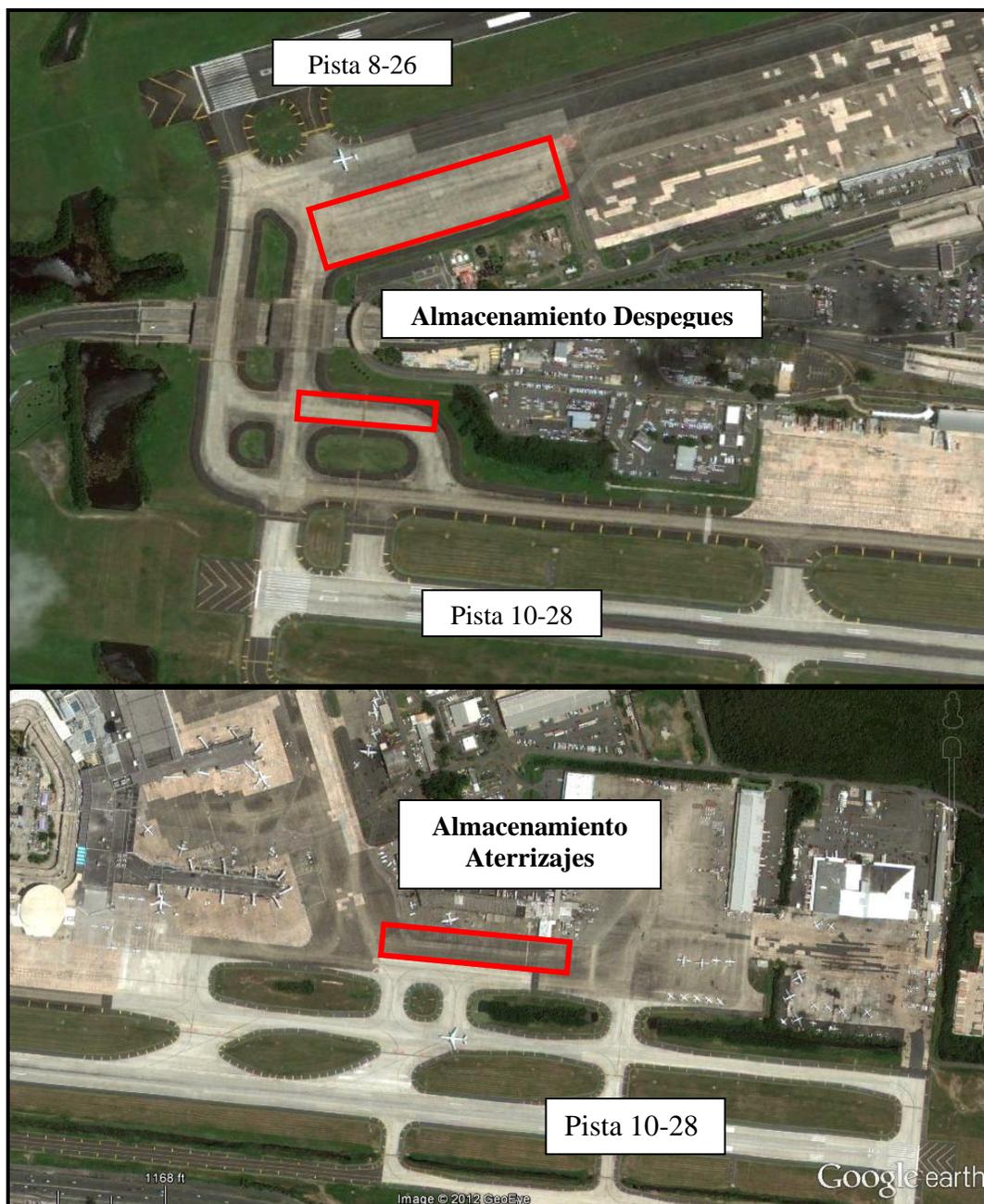


Figura 6.21. Ubicación de áreas de almacenamiento temporero de las pistas del aeropuerto SJU

6.3.2 *Tiempos de Ocupación*

Los tiempos de ocupación de pista en el aeropuerto SJU fueron obtenidos principalmente para aquellas aeronaves que utilizan el Terminal A. El tiempo de ocupación de pista comprende el tiempo transcurrido desde que un avión sobrevuela el umbral de la pista hasta que despeja la pista para aterrizajes y para despegues desde que el avión entra a la pista hasta que despeja la misma. Los tiempos de ocupación mostrados en la Tabla 3.7 fueron tomados durante los días 2 y

4 de octubre de 2012 en el aeropuerto SJU. Debido a la posición del observador, los datos del día 2 de octubre sólo incluyen el tiempo de ocupación de pista en operaciones de la pista 10-28 ya que no se logró observar las operaciones en la pista 8-26; para este día sólo se tomaron datos de tiempo de ocupación de pista en aterrizaje y tiempo en plataforma en el Terminal A. Para el día 4 de octubre de 2012 se hicieron los ajustes para recopilar información de operaciones en la pista 8-26.

6.3.2.1 Tiempo de ocupación de pista para aterrizaje y despegue

La configuración y geometría de las salidas de pista fueron evaluadas en la sección para el aeropuerto SJU y por lo tanto sólo es necesario evaluar el tiempo de ocupación de pista de las naves que utilizan el Terminal A así como otros destinos.

El tiempo de ocupación de pista promedio obtenido para el aeropuerto SJU fue de 58.1 segundos. Este promedio incluye ambas operaciones ya que se asume que no existe diferencia significativa entre estas. El tiempo promedio obtenido representa una demora de 18.1 minutos y esta demora resulta en un retraso para los datos de transporte aéreo tomados por la BTS de 3.1 minutos (mayor a los 15 minutos de gracia). Utilizando la escala desarrollada para esta evaluación (Tabla 5.26) se obtiene una puntuación de dos para un nivel de servicio adecuado.

6.3.2.2 Tiempo de ocupación de calles de rodaje

El tiempo promedio de ocupación de calles de rodaje en el aeropuerto Luis Muñoz Marín, para aviones utilizando el Terminal A, fue de 2.88 minutos para aviones luego de aterrizar y 8.05 minutos para aviones que se dirigen a despegar. El tiempo promedio desde el Terminal A a la pista de despegue (pista 8-26) es mayor que el tiempo promedio desde la pista de aterrizaje (pistas 10-28) hasta el Terminal A. Esta diferencia en tiempos de ocupación en las calle de rodaje es debida a la ubicación del Terminal A con respecto a las pistas y el tiempo que toma llevar a cabo el *push back* del avión. El *push back* o empuje de retroceso es el proceso por el cual el avión es llevado desde la puerta de salida hasta las calles de rodaje por un vehículo amarrado a la rueda delantera del avión.

Para el aeropuerto SJU no es necesaria la evaluación de este factor ya que las calles de rodaje no cruzan una pista activa. Por esta razón se elimina este factor de la evaluación y se evalúan los restantes factores en base a la suma de sus pesos en el modelo.

6.3.2.3 Tiempo de ocupación de plataforma

La aerolínea que realiza operaciones en el Terminal A del aeropuerto SJU utiliza dos tipos de aviones: Airbus 320 (A320) y Embraer 190 (E90) con capacidad de 150 y 100 pasajeros, respectivamente. La aeronave A320 se utiliza regularmente para vuelos domésticos mientras que la aeronave E90 se utiliza mayormente para vuelos internacionales. La aerolínea operando en las salidas del Terminal A estima un tiempo de ocupación promedio de 30 minutos para un vuelo en un avión E90, 40 minutos para un vuelo en un avión A320, y 50 minutos para un vuelo en un avión internacional en cualquier tipo de avión. La diferencia en el tiempo de ocupación estimado para el avión A320 y E90 se debe a la diferencia en capacidad de pasajeros de los aviones. El incremento en el tiempo promedio de ocupación de plataforma para vuelos internacionales se debe a que el Terminal A carece de un proceso de inmigración, requerido para vuelos internacionales. Por tal razón, los vuelos internacionales deben realizar el desembarque en el Terminal C y luego trasladar el avión, por medio de vehículos de arrastre, hasta el Terminal A para realizar el embarque de pasajeros y equipaje.

Para este estudio se tomaron datos de tiempo de recorrido de los aviones, comenzando cuando las aeronaves llegan a plataforma hasta que abandonan la misma. Ya que los vuelos internacionales desembarcan en el Terminal C, no se logró visualizar el momento en que estos llegaban a la plataforma correspondiente y por lo tanto no se evalúan en este análisis. Sin embargo, la mayoría de los vuelos domésticos se realizan en aviones A320 por lo que se decidió evaluar el tiempo promedio de ocupación de plataforma de dichas aeronaves.

Los datos tomados resultaron en un tiempo promedio de ocupación de plataforma de 53.3 minutos para vuelos domésticos en aviones tipo A320, lo cual representa una demora promedio de 13.3 minutos al tiempo promedio estimado por la aerolínea a cargo de estos vuelos. Según la escala de evaluación desarrollada en la metodología, los vuelos domésticos en aviones A320 muestran un nivel de servicio de C con una puntuación de tres.

6.4 Resumen de Resultados

La metodología desarrollada fue utilizada con éxito para evaluar la infraestructura y operación del aeropuerto SJU y su nuevo Terminal A. El modelo de evaluación con los resultados de la evaluación al aeropuerto SJU se muestra en la Tabla 6.32.

Tabla 6.32 Resultados de evaluación de la zona aérea del aeropuerto SJU

Área de Evaluación	Peso por relevancia a la Infraestructura y Operación de un aeropuerto			
	Zona	Categoría	Factor	Puntos
	Peso	Peso	Peso	(0-5)
1. Zona Terrestre	17.3/20%	86.5/100%		
1.1 Acceso al Aeropuerto		28%/35%	80/100%	
a) Modos de transporte disponibles			50/50%	5/5
b) Rutas de acceso			30/50%	3/5
1.2 Acceso al Edificio Terminal		58.5/65%	90/100%	
c) Estacionamiento públicos			35/35%	5/5
d) Área para carga y descarga de pasajeros			45/45%	5/5
e) Instalaciones peatonales			10/20%	2.5/5
2. Zona Terminal	22.6/35%	64.5/100%		
2.1 Procesamiento de Pasajeros		46.6/75%	52.8/85%	
f) Registro completo de pasajeros			10/15%	3.35/5
g) Auto-registro de pasajeros en kioscos			15/15%	5/5
h) Entrega de equipaje			14.3/15%	4.75/5
i) Revisión de seguridad			13.5/25%	2.7/5
j) Revisión de inmigración			0/15%	0/5
k) Reclamo de equipaje			45%	N/A
l)				
2.2 Influencias Adicionales		17.9/25%	71.4/100%	
m) Dispositivos de información			24/40%	3/5
n) Espacio para filas y flujo de pasajeros			28.6/40%	3.57/5
o) Número de asientos y área de espera por salida			18.8/20%	4.7/5
3. Zona Aérea	32.7/45%	72.7/100%		
3.1 Configuración y Geometría		42.7/50%	85.3/100%	
p) Capacidad de pistas			35/35%	5/5
q) Geometría de pista			11.3/15%	3.75/5
r) Configuración y geometría de salidas de pista			18/20%	4.5/5
s) Configuración y geometría de calles de rodaje			13.5/15%	4.5/5
t) Áreas de almacenamiento temporero			7.5/15%	2.5/5
3.2 Tiempos de ocupación		30/50%	60/100%	
u) Tiempo de ocupación de pista			16/40%	2/5
v) Tiempo de ocupación de calles de rodaje			20/20%	5/5
w) Tiempo de ocupación de plataforma			24/40%	3/5
Total de Evaluación	72.6/100%			

6.4.1 Zona Terrestre

La zona terrestre muestra un nivel de servicio alto en la escala de nivel de servicio desarrollada para la metodología creada siguiendo la definición de la IATA. Este resultado se obtiene de la suma de los niveles de servicio para los accesos al aeropuerto SJU y los accesos al Terminal A, luego de arribar al aeropuerto.

Según los resultados de la evaluación, el aeropuerto SJU muestra una alta accesibilidad tanto para el área comercial como para la zona de carga. Los accesos a estas zonas se encuentran separados por lo que el tráfico se divide evitando una mayor congestión en el área comercial del aeropuerto. El aeropuerto ofrece los modos de transporte necesarios para cumplir con la puntuación máxima en la evaluación de este factor. Aunque el aeropuerto SJU provee el número de rutas necesarias para un aeropuerto de mediana capacidad, estas rutas son vías principales en las cuales se genera gran congestión a las horas pico del aeropuerto. El nivel de congestión de las vías es el único aspecto que impacta negativamente la evaluación de los accesos al aeropuerto.

En la evaluación del acceso al edificio terminal el Terminal A del aeropuerto SJU cuenta con un diseño de áreas de carga y descarga de pasajeros acorde con las especificaciones y guías de la FAA y la ACRP. El estacionamiento del aeropuerto contiene un número de estacionamientos mayor al necesario, calculado mediante el número de embarques del aeropuerto en el año 2011. Las instalaciones peatonales desde el estacionamiento hasta el Terminal A carecen, en ciertos tramos, del ancho de acera recomendado. Además, los pasajeros deben caminar una distancia mayor (1300 pies) al máximo permitido de 1000 pies para llegar al terminal y viceversa. La evaluación del acceso al Terminal A del aeropuerto SJU resulta en un nivel de servicio excelente representado por un 90% de cumplimiento con los elementos evaluados.

6.4.2 Zona Terminal

El Terminal A del aeropuerto SJU muestra un nivel de servicio adecuado con un 65.2%, según la evaluación realizada en esta investigación. La categoría de procesamiento de pasajeros resultó en un nivel de servicio adecuado con un 62.1%. Este nivel de servicio se basa en el análisis de las métricas de procesamiento en periodos de alta demanda y las dimensiones recomendadas por la ACRP y FAA para cada uno de los procesos. El resultado obtenido se debe primordialmente a la necesidad de un área para el proceso de revisión de inmigración en el terminal y a los elevados tiempos de espera y largo de fila en el proceso de revisión de seguridad para el escenario evaluado.

Las influencias adicionales evaluadas en el Terminal A resultaron en un nivel de servicio bueno con 74.2%. Las áreas de mayor oportunidad son el espacio para fila y circulación de pasajeros y los dispositivos de información del terminal. En la evaluación del espacio para fila y circulación de pasajeros el ancho del área para abordaje en todas las salidas es menor al mínimo

recomendado por la ACRP (2010). En relación a los dispositivos de información, se observó durante la investigación un alto porcentaje de pasajeros perdidos en búsqueda de distintas áreas de interés. Esto llevó a la puntuación otorgada al sistema de rótulos y pantallas de información ofrecidas en el Terminal A.

6.4.3 Zona Aérea

La zona aérea del aeropuerto SJU resultó con un nivel de servicio bueno representado por un total de 72.7% de cumplimiento con los elementos y factores operacionales evaluados.

La configuración y geometría de la zona aérea del aeropuerto SJU resultó en un 85.3% de cumplimiento con las regulaciones y recomendaciones evaluadas para los elementos de esta zona. La zona aérea del aeropuerto muestra cumplir con la mayoría de los requerimientos y recomendaciones para los elementos operacionales que la componen. El elemento funcional que más afectó el resultado de la evaluación lo fueron las áreas de almacenamiento temporero de aeronaves. Aunque las áreas de almacenamiento temporero están presentes en las pistas del aeropuerto SJU, no se encuentran en todas las operaciones donde son necesarias. La pista 8-26 no provee un area de almacenamiento temporero para las operaciones de aterrizaje y el área provista para las operaciones de aterrizaje en la pista 10-28 no es lo más conveniente ya que obstruye un área de plataforma existente.

Los tiempos de ocupación de los aviones en los distintos procesos evaluados mostraron un nivel de rendimiento adecuado con un total de 60% de resultado en la evaluación. Los procesos que afectaron el resultado de la evaluación de esta categoría fueron el tiempo de ocupación de pista y el tiempo de ocupación de plataforma. El tiempo de ocupación de pista promedio fue de 58.1 segundos para ambas operaciones. Este valor es mayor a los tiempos promedios de tiempo de ocupación en despegues (50 seg.) y aterrizaje (40 seg.) estimados por la ACRP (2010). Es también mayor al valor obtenido en la investigación llevada a cabo por la FAA (46 seg.) en tres aeropuertos de alta capacidad de Estados Unidos (Weiss y Barrer, 1984). El tiempo de ocupación de plataforma resultó en una demora promedio de 18.1 minutos por nave en comparación con el itinerario de vuelo de la aerolínea a cargo del vuelo. Esta demora se traduce en un retraso promedio de 3.1 minutos por avión según la definición de retraso en las estadísticas de la BTS.

6.4.4 Zonas Acumuladas de Forma Ponderada

El aeropuerto SJU muestra un total de 73% para las tres zonas evaluadas, el cual representa un nivel de servicio bueno. Las zonas que más afectaron este resultado fueron la zona terminal y la zona aérea por el peso asignado a estas y el nivel de servicio obtenido.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se resumen las conclusiones y recomendaciones generadas en base a la metodología de evaluación de aeropuertos desarrollada y el estudio de caso del Aeropuerto SJU. Las conclusiones se dividen entre los hallazgos relacionados al desarrollo del modelo y la metodología de evaluación de infraestructura y operación de aeropuerto y los resultados del estudio de caso del aeropuerto SJU.

7.1 Conclusiones

7.1.1 *Modelo y Metodología de Evaluación de Infraestructura y Operación de Aeropuertos*

El modelo de evaluación en matriz permitió dividir el aeropuerto en las zonas de mayor interés: la zona terrestre, zona terminal y zona aérea. Las zonas, categorías y factores que componen el modelo fueron sopesados en base a su relevancia o importancia con la operación de un aeropuerto. Aunque se utilizaron los recursos disponibles para asignar los pesos a los aspectos evaluados por el modelo, es posible que una persona con mayor experiencia en este campo pueda discrepar de lo estipulado en el modelo. Es necesario enfatizar que el juicio y la experiencia de la persona evaluando dichos factores influencia este procedimiento. En todo caso, este se considera un modelo piloto y no una norma, por lo que debe usarse el juicio para determinar su mejor aplicación.

Medidas subjetivas, como por ejemplo los pesos asignados al modelo, son algunas de las razones por la que hasta el momento no se ha aceptado una metodología estándar para la evaluación de aeropuertos. La asignación de pesos para el modelo desarrollado, aunque se realizó de forma subjetiva, se basa directamente en las diferentes investigaciones realizadas en el campo de la evaluación de aeropuertos y las observaciones hechas en campo.

Los rasgos independientes de cada aeropuerto dificultan la posibilidad de incluir la mayoría de estos en una misma metodología de evaluación. Sin embargo, esta metodología piloto posibilita la evaluación de todos los aeropuertos comerciales regulados por la FAA. Se logró mediante esta metodología la evaluación de los aspectos investigados recientemente por el nuevo programa de investigación de aeropuertos ACRP.

Durante el desarrollo de la metodología para la evaluación de aeropuertos se identificó la necesidad de un método actualizado para la determinación del número necesario de

estacionamientos en un aeropuerto. La curva utilizada en la metodología, desarrollada por la FAA, se formó con datos de una muestra de aeropuertos en 1988. En la muestra de aeropuertos incluidos solo se embarcaban hasta 4.0 millones de pasajeros anualmente. Esta curva no representa los aeropuertos de alta capacidad ni aproximadamente el 50% de los aeropuertos de mediana capacidad en la actualidad. Sin mencionar que la tendencia de uso de estacionamientos en aeropuertos puede haber variado significativamente desde la toma de esta muestra. Un método alternativo considera 1.5 veces el número de embarque a la hora pico del aeropuerto como el número de estacionamientos necesarios. Este método se considera de muy alta variación ya que un aeropuerto puede manejar diferentes números de embarques a diferentes horas pico para un mismo año de operación.

La metodología diseñada para la evaluación de un terminal recopila la mayoría de las métricas identificadas en la literatura para la evaluación de esta zona. Sin embargo, no se hallaron escalas de nivel de servicio para la evaluación de cada una de las métricas utilizadas. El tiempo de servicio de los diferentes procesos en un terminal fue evaluado utilizando la escala de evaluación del tiempo de espera, creada a base de los puntos de cambio en el tiempo de espera en los procesos de un terminal, identificados por la ACRP (2010). Se describió en la metodología un proceso estándar para obtener una muestra representativa de las métricas en los procesos evaluados en esta zona. Las dimensiones de espacio en cada proceso se tomaron en consideración y se evaluaron realizando una comparación de estas con las dimensiones mínimas recomendadas por las guías de diseño de la ACRP (2010) y la FAA (2012).

La zona aérea es la zona de mayor peso en el modelo ya que de esta zona principalmente depende la capacidad de operación de un aeropuerto. Aunque el rendimiento de un aeropuerto se mide regularmente tomando en cuenta el porcentaje de demoras que este obtiene anualmente, no existía una forma de determinar un nivel de servicio asociado a esta métrica. En la metodología desarrollada para la evaluación de la zona aérea de un aeropuerto se incluyó un procedimiento para determinar el nivel de servicio del aeropuerto en base a un estimado de demora promedio por avión. Esta demora está relacionada directamente a la razón de demanda que maneja el aeropuerto.

La evaluación del tiempo de ocupación de aviones en los distintos elementos, además de la configuración y geometría de los elementos de la zona aérea, permite hacer una comparación entre el rendimiento esperado y el rendimiento real de esta zona. Esto tomando en consideración

que las estructuras no siempre se utilizan de la forma que se prevé en el diseño y esto puede afectar el rendimiento de la misma. Además, las guías de diseño utilizadas actualmente fueron desarrolladas para la década de los 80 por lo que no necesariamente reflejan el comportamiento actual en los aeropuertos.

La evaluación de los tiempos de ocupación de plataforma se llevó a cabo utilizando el tiempo máximo en plataforma estimado por las aerolíneas. Esto ya que no existe un estándar que identifique el tiempo necesario en plataforma de un aeroplano. Las aerolíneas determinan sus propios tiempos de ocupación de plataforma basados en el tipo de vuelo (doméstico o internacional), capacidad del aeroplano y mantenimiento requerido. La falta de un estándar asociado al tiempo en plataforma de aeroplanos conlleva una alta variación del tiempo en plataforma para distintas aerolíneas y por lo tanto para un mismo aeropuerto.

7.1.2 Evaluación del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín

Mediante esta tesis se evalúa la infraestructura operacional del Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín utilizando el modelo y metodología desarrollados con este propósito. Las tres distintas zonas en las que se divide un aeropuerto son evaluadas independientemente para finalmente obtener el nivel de servicio del aeropuerto, basado en la definición de LOS desarrollada por la IATA y la escala de evaluación creada en la realización de este estudio.

La zona terrestre del aeropuerto SJU resultó con un nivel de servicio alto en la evaluación realizada. El aeropuerto cuenta con una buena accesibilidad, evaluado por el número de modos y vías de acceso disponibles. Sin embargo, las vías de acceso muestran un nivel de servicio inadecuado en las horas pico del aeropuerto. El área de carga y descarga de pasajeros del Terminal A del aeropuerto SJU cumple con los requerimientos y recomendaciones de las guías de diseño utilizadas para su evaluación y por lo tanto muestra un nivel de servicio excelente. Sin embargo, el diseño de esta área no es el mismo para el resto de los terminales por lo que no es posible asumir este nivel de servicio para todos los terminales del aeropuerto. El estacionamiento del aeropuerto contiene un número de espacios mayor al necesario, calculado mediante el número de embarques del aeropuerto en el año 2011. Las instalaciones peatonales desde el estacionamiento hasta el Terminal A carecen, en ciertos tramos, del ancho de acera recomendado. Además, se necesita caminar un tramo más largo al máximo recomendado para esta zona sin la posibilidad de utilizar un servicio de autobús.

La evaluación del Terminal A del aeropuerto SJU resultó en un nivel de servicio adecuado. Las métricas de procesamiento de pasajeros en el terminal fueron medidas mediante la simulación de cada uno de los procesos de forma individual. Los resultados de la evaluación de los procesos mostraron un nivel de servicio inadecuado. Esto debido principalmente a que el terminal no provee un área de revisión de inmigración y al nivel de servicio inadecuado del proceso de revisión de seguridad en el terminal.

Las influencias adicionales muestran un nivel de servicio adecuado con las principales deficiencias en los dispositivos de información y los espacios provistos en las salidas del terminal. Algunos dispositivos de información se encuentran mal ubicados y esto propicia la interrupción del flujo de pasajeros, Además, los mensajes por rótulos no están llegando de forma eficiente ya que se observó un alto porcentaje de pasajeros perdidos en el terminal. Espacios menores a los mínimos recomendados en la salida tres provoca la obstrucción del pasillo de circulación a la hora de abordaje. Esto ocasiona un efecto negativo en el terminal y por lo tanto se reflejó en la evaluación del terminal.

La zona aérea del aeropuerto SJU muestra un nivel de servicio bueno (C, según la definición de LOS de IATA). Este nivel de servicio indica que el aeropuerto SJU está capacitado para manejar la demanda aérea existente para el año de evaluación e inclusive un incremento futuro en la demanda. La zona aérea del aeropuerto muestra cumplir con la mayoría de los requerimientos y recomendaciones para los elementos operacionales que la componen. Las penalidades más significativas en la evaluación de la zona aérea se obtuvieron en las áreas de almacenamiento temporero y los tiempos de ocupación de pista y plataforma para el Terminal A. El elemento funcional que más afectó el resultado de la evaluación lo fueron las áreas de almacenamiento temporero de aeronaves. Las pistas del aeropuerto no proveen el total de las áreas de almacenamiento temporero necesarias para la operación del aeropuerto y por esta razón está propenso a una disminución en capacidad en los periodos pico de tráfico aéreo para el aeropuerto.

Los tiempos de ocupación de los aviones en los distintos procesos evaluados mostraron un nivel de rendimiento adecuado en la evaluación. Los procesos que afectaron el resultado de la evaluación de esta categoría fueron el tiempo de ocupación de pista y el tiempo de ocupación de plataforma. Este resultado resulta menor a la evaluación de configuración y geometría de la zona aérea del aeropuerto. Este resultado sugiere que una posible causa del alto porcentaje de retrasos

en el aeropuerto SJU, no necesariamente está relacionado a la infraestructura, sino más bien al manejo de los procesos operacionales por parte de las aerolíneas.

Los datos estadísticos del aeropuerto SJU recopilados por la oficina de estadísticas de transportación para el año 2011 indican que 38% de los vuelos retrasados en el aeropuerto SJU son por causa de las aerolíneas. Tomando en cuenta los vuelos que llegan retrasados de otros aeropuertos, el porcentaje de retrasos atribuido a las aerolíneas incrementa a 60%. Estas estadísticas indican, lo que la investigación sugiere: una de las causas para el retraso de vuelos en el aeropuerto SJU se debe al manejo de los procesos por las aerolíneas a cargo de las operaciones.

7.2 Recomendaciones

Para lograr añadir precisión a la metodología desarrollada es necesario crear escalas de evaluación en base a datos representativos de los aspectos evaluados. Futuras investigaciones deben enfocarse en el desarrollo de estas medidas de evaluación. Se recomienda enfatizar futuras investigaciones en los siguientes criterios relacionados a la evaluación de infraestructura operacional de aeropuertos:

- La distribución de pesos asignados a las diferentes zonas, categorías y factores o elementos evaluados por el modelo mediante una encuesta a expertos en el área.
- Una muestra representativa de número de estacionamientos para cada una de las categorías de aeropuertos actualmente utilizados (grande, mediano, pequeño).
- Escala de nivel de servicio de procesos en aeropuertos mediante el análisis de un número de datos representativo de aeropuertos regulados por la FAA.
- Una escala de nivel de servicio de aeropuertos basado en el porcentaje de vuelos retrasados anualmente o el tiempo promedio de retraso de cada vuelo.
- Escalas de nivel de servicio o rendimiento del tiempo de ocupación de pistas, calles de rodaje y/o plataforma.

Los porcentajes asignados a cada criterio, aunque fueron revisados por expertos en la materia, se recomienda llevar a cabo un análisis de sensibilidad. En este análisis se evalúa cómo se ve afectado el resultado obtenido mediante el modelo realizando variaciones a los porcentajes asignados a cada factor evaluado. Mediante este análisis es posible establecer un rango de confiabilidad del resultado obtenido por el modelo.

Los aeropuertos tienen definidos planes de operación en caso de una emergencia. La operación de un aeropuerto en caso de emergencia no fue considerada para el desarrollo del modelo de evaluación de esta investigación. Se recomienda incluir en futuras investigaciones en el área de evaluación de aeropuertos, el plan de operación en caso de emergencia. De esta forma se lograría evaluar este tipo de operación y determinar deficiencias en el plan.

En relación a los tiempos de ocupación de la zona aérea, es necesario definir un estándar en el tiempo de ocupación de plataforma en correlación al tipo de vuelo, capacidad de carga y mantenimientos requeridos por la nave. La estandarización de este factor disminuiría significativamente las altas variaciones obtenidas en los tiempos en plataforma entre una aerolínea y otra.

Según los factores evaluados de infraestructura y operación del aeropuerto SJU, este ofrece un nivel de servicio adecuado. Por tal motivo no son necesarias mejoras inmediatas a ninguna de las zonas evaluadas. Sin embargo, el aeropuerto presenta varias áreas de oportunidad para mejorar su operación. Estas oportunidades pueden ayudar a mantener o incrementar el nivel de servicio ofrecido actualmente y a su vez mejorar o incrementar la capacidad del aeropuerto para manejar el incremento futuro en demanda, estimado en 3% anual por la FAA. La Tabla 7.1 muestra un resumen de las deficiencias encontradas y las alternativas generadas para mitigar o aliviar estas.

Tabla 7.1 Deficiencias encontradas y alternativas de mitigación para el aeropuerto SJU

Deficiencia	Alternativas de mejora	Plazo de Implementación de alternativa	Impacto en evaluación
Vías de acceso muestran congestión en periodos pico del aeropuerto	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar sistema de transporte colectivo AMA • Implementar sistemas de ITS para mejor manejo del tráfico 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto • Mediano 	Bajo
Distancias de caminata desde estacionamiento a Terminal A mayor a 1000 pies	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar sistema de transporte colectivo con viajes desde el estacionamiento hasta los terminales • Construir un acceso directo desde el estacionamiento hasta el Terminal A 	<ul style="list-style-type: none"> • Mediano • Mediano 	Bajo

Ancho de aceras frente a los terminales menores a 12 pies	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanchar aceras frente a los terminales para cumplir con el mínimo recomendado por la FAA. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto 	Bajo
Terminal A no contiene un aérea designada para el procesamiento de pasajeros internacionales	<ul style="list-style-type: none"> • Definir área de procesamiento de pasajeros internacionales en el Terminal A. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto 	Alto
Proceso de registro con empleado del Terminal A muestra un largo de fila mayor a su capacidad en periodos pico de operación	<ul style="list-style-type: none"> • Alargar serpentina para fila en el proceso de registro con empleado del Terminal A. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto 	Bajo
Largo de fila y tiempo de espera inadecuados en proceso de revisión de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Añadir recursos al proceso para acortar el tiempo de espera y expandir el área de captación de fila. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto 	Alto
Pantalla de información sobre vuelos mal ubicada, justo al lado de la salida 3 del Terminal A.	<ul style="list-style-type: none"> • Reubicar pantalla de información ya que no provee el espacio necesario para el flujo de pasajeros y crea puntos de conflicto de flujo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto 	Bajo
Espacios para fila y flujo de pasajeros en el Terminal A se encuentran por debajo del mínimo recomendado por la FAA.	<ul style="list-style-type: none"> • Reubicar el espacio para fila de embarque de la salida 3 ya que confluye con el área de registro de seguridad. • Incrementar espacio para flujo de pasajeros frente a concesionarios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto 	Bajo
Área de almacenamiento temporero necesaria en las operaciones de aterrizaje en la pista 8-26.	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar un área de almacenamiento temporero para las operaciones de aterrizaje en la pista 8-26. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mediano 	Medio
Tiempos altos de ocupación de pista y plataforma	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar el uso correcto de salidas de pista por los pilotos • Aumentar la cuota a aerolíneas por tiempo en plataforma • Encontrar formas eficientes de realizar los procesos en plataforma 	<ul style="list-style-type: none"> • Mediano • Mediano • Mediano 	Alto

Mediante el modelo de evaluación se identificó que el tiempo de ocupación de plataforma produce que los vuelos se retrasen. Una solución radical a esta situación puede ser aumentar la

tarifa por hora que deben pagar las aerolíneas por tener un avión estacionado en el aeropuerto. De esta forma las aerolíneas se verían obligadas a salir a tiempo para no incurrir en gastos adicionales.

Es necesario identificar las causas de retraso de las aerolíneas para poder incrementar el número de vuelos a tiempo en el aeropuerto SJU. Se recomienda llevar a cabo un estudio enfocado en las causas de retrasos de las aerolíneas en el aeropuerto SJU para así identificar alternativas que brinden alivio al número de vuelos retrasados que tanto perjudica la percepción de los pasajeros del nivel de servicio de un aeropuerto.

REFERENCIAS

- Airbus, 1992. *Airplane Characteristics for Airport Planning; AIRBUS S.A.S. Customer Services*?. FRANCE. revisado en Junio, 2012.
- Airports Cooperative Research Program (ACRP), 2008. *Airport Passenger-Related Processing Rates Guidebook*. Informe 23. Transportation Research Bureau, Washington D.C.
- Airports Cooperative Research Program (ACRP), 2010. *Airport Passenger Terminal Planning and Design*. Informe 25, Transportation Research Bureau. Washington D.C.
- Airports Cooperative Research Program (ACRP), 2011. *Passenger Level of Service and Spatial Planning*. Informe 55. Transportation Research Bureau. Washington D.C.
- Airports Cooperative Research Program (ACRP), 2011b. *Wayfinding and Signing Guidelines for Airport Terminals and Landside*. Informe 52, Transportation Research Bureau. Washington D.C.
- Airports Cooperative Research Program (ACRP), 2012. *Evaluating Airfield Capacity*. Informe 79. Transportation Research Bureau. Washington D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2004. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Chapter 3. *Guide for the Planning, Design, and Operation of Pedestrian Facilities*.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2009. *Guidance Principles for the Nation's Critical Infrastructure*. Lansdowne Resort, Leesburg, VA.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013. *2013 Report Card for America's Infrastructure*. Disponible en: <http://www.infrastructurereportcard.org>, [último acceso en marzo 6 del 2013].
- Banuchi, R., 2012. *JetBlue estrena la Terminal A del Aeropuerto Luis Muñoz Marín*. Periódico Primera Hora. Disponible en: <http://www.primerahora.com/noticias/puerto-rico/nota/jetblueestrenalaterminaladelaerpuertoluismunozmarin-664207/> [Accesado el 20 de febrero del 2013]

- Bartolomei, S, 2011. *Simulación de Sistemas*. Presentación de clase. Departamento de Ingeniería Industrial, ININ 6026. Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez. Primer semestre, año académico 2011-2012. Mayaguez, Puerto Rico
- Brink, M. y Madison, D. *Identification and measurement of capacity levels of service of landside elements of the airport*. In airport landside capacity, Special Report 159, Transportation Research Board, Washington, DC, 1975
- Brunetta, L. y Jacur, G. R., 1999. *A Flexible Model for the Evaluation of an Airport Terminal*. Milano, Italy.
- Bureau of Transportation Statistics. *Understanding the Reporting of Causes of Flight Delays and Cancellations*. Disponible en: <http://www.transtats.bts.gov> [último acceso el 27 de abril del 2013].
- Correia, A. B. y Wirasinghe, S. C., 2004. *Evaluating Level of Service at Airport Passenger Terminals*. Transportation Research Board: Journal of the Transportation Research Board, TRB, pp. 1–6.
- Correia, A. B. y Wirasinghe, S. C., 2006. *Development of level of service standards for airport facilities: Application to Sao Paulo International Airport*. Journal of Air Transportation Management.
- Federal Aviation Administration (FAA), 1983. *Airport Capacity and Delay Advisory Circular 150/5060-5*.
- Federal Aviation Administration (FAA), 1980. *Facility Requirements*. Advisory Circular 150/5360-9.
- Federal Aviation Administration (FAA), 1988. *Planning and Design Guidelines for Airport Terminal Facilities*. Advisory Circular 150.-5360-13.
- Federal Aviation Administration (FAA). *Passenger Boarding (Enplanement) and All-Cargo Data for U.S. Airports*. [Último acceso en marzo 22 del 2014] Disponible en: http://www.faa.gov/airports/planning_capacity/passenger_allcargo_stats/passenger/year
- Federal Aviation Administration (FAA), 2008. *National Plan of Integrated Airport Systems (NPIAS) 2009–2013*, Report to Congress.

- Federal Aviation Administration (FAA), 2012. *Airport Design*. Advisory Circular 150/5300-13A.
- Google Earth, 2012. Imagen satelital del Aeropuerto Internacional Luis Muños Marín.
Disponible en: <http://earth.google.com> [Ultimo acceso el 18 de septiembre del 2012].
- Gualda, N. F., 1978. *Modelling the Airport Terminal Building for Capacity Evaluation Under Level Of Service Criteria*, Ph. D. thesis, University of Texas, Austin, Texas.
- Hathaway, D.D. 1995. *Airport access model data requirements*. In *Sixty-fifth annual meeting compendium of technical papers*, 9-13. Denver: Institute of Transportation Engineers.
- Heathington, K. W. y Jones, D. H., 1975. *Identification of Levels of Service and Capacity of Airport Landside Elements in Airport Landside Capacity: Special Report 159*, TRB. Washington D.C.
- Lagares, B. P. y Puerto, A. J., 2001. *Población y muestra. Técnicas de muestreos*, Management Mathematics for European Schools, pp.20.
- Lemer, A. C. *Measuring Airport Landside Capacity*, Transportation Research Record 1199, TRB, pp. 12–18, 1988.
- Majaro, S., 1988. *The creative gap: managing ideas for profit*. Longman, London.
- Martel, N. y Seneviratne, P. N., 1990. *Analysis of Factors Influencing Quality of Service in Passenger Terminal Buildings*. Transportation Research Record 1273, TRB, pp. 1–10.
- Martel, N. y Seneviratne, P. N., 1991, *Variables Influencing Performance of Air Terminal buildings*. Transportation Planning and Technology, Vol. 16, No. 1. pp. 3–28.
- McCullough, B. F. y Roberts, F. R, 1979. *Decision Tool for Analysis of Capacity of Airport Terminal Buildings*. Transportation Research Board Record 732, National Academy of Sciences. Washington, D. C. pp. 41-54
- Mumayiz, S.A., 1991. *Evaluating performance and service measures for the airport landside*. Transportation Research Record 1296, TRB, Washington, DC.
- National Cooperative Research Highway Program, 2008 *Multimodal Level of Service Analysis for Urban Street*. Informe 616. TRB, Washington D.C. pp. 5-8.

- Nieves, G., 2003. *Técnicas participativas para la planeación: Procesos breves de intervención*. Fundación ICA, A.C.. México D.F. pp. 197-224
- Neufville, R., 2007. *Design of Components of Airports Passenger Buildings*. Class presentation. Airport System Planning and Design. MIT. Boston, Massachusetts.
- Puerto Rico Ports Authority (PRPA), 1995. *Master Plan Technical Report*. Revisado en el 2000. San Juan, Puerto Rico.
- Puerto Rico Ports Authority (PRPA), 2012. *Aviation Statistics Report; Fiscal Year 2011*. Tarriff and Economics Research Office. pp. 7-14.
- Sierra, E. Director de Operaciones, Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín, Entrevista efectuada el 1 de octubre del 2012.
- Transport Canada, 1979. *A discussion Paper on Level of Service Definition and Methodology for Calculating Airport Capacity*. Air Services Branch, Tp 2027, Canadian Air Transportation Administration, Ottawa.
- Transportation Research Board (TRB), 1987. *Measuring Airport Landside Capacity*, Informe Especial 21. TRB, National Research Council, Washington.
- Vásquez, Y. et al., 2011. *Informe para la Evaluación de Infraestructura de Aeropuertos*, Informe preparado para la Autoridad para las Alianzas Público-Privadas, Universidad de Puerto Rico, recinto Universiario de Mayagüez. Mayagüez, Puerto Rico.
- Weiss, W.E.y Barrer, J.N., 1984. *Analysis of Runway Occupancy Time and Separation Data Collected at La Guardia, Boston, and Newark Airports*. Advisory Circular A154 130, Federal Aviation Administration.

APÉNDICES

Apéndice A - Acrónimos

- **A4A** – Aerolíneas por América
- **AASHTO** -
- **ACI** - Consejo Internacional de Aeropuertos
- **ACRP** – Programa Cooperativo de Investigación en Aeropuertos
- **ARC** - Código de Referencia de Aeropuerto
- **ASCE** – Asociación Americana de Ingenieros Civiles
- **ASV** - Volumen de Servicio Anual
- **BTS** – Oficina de Estadísticas en Transportación
- **CBP** - Aduanas y Protección Fronteriza de los EE.UU
- **FAA** - Administración Federal de Aviación
- **FY2011** – Año Fiscal 2011
- **FY2012** - Año Fiscal 2012
- **HCM** - Manual de Capacidad de Carreteras
- **IATA** - Asociación de Transporte Aéreo Internacional
- **ICAO** – Organización Internacional de Aviación Civil
- **IFR** – Regla de Vuelo por Instrumentación
- **IMC** - Condiciones Meteorológicas de Vuelo por Instrumentación
- **LOS** – Nivel de Servicio
- **MSL** – Nivel promedio del mar
- **MUTCD** - Manual de Dispositivos Uniformes para el Control de Transito
- **NAS** – Sistema Nacional de Aviación
- **NCHRP** - Programa Nacional Cooperativo de Investigación en Carreteras
- **PAPR** – Autoridad de los Puertos de Puerto Rico
- **QOS** - Calidad de Servicio
- **RSA** - Área de Seguridad de la Pista
- **SIMIO** – Sistema de Modelos de Simulación Basado en Objetos Inteligente

- **SJU** – Aeropuerto Internacional Luis Muñoz Marín
- **TCRP** – Programa Cooperativo de Investigación en Transporte Colectivo
- **TSA** - Administración de Seguridad en la Transportación
- **TRB** – Junta de Investigación sobre Transportación
- **USDOT** – Departamento de Transportación de Estados Unidos
- **VFR** – Regla de Vuelo Visual
- **VMC** – Condiciones Meteorológicas de Vuelo Visual

Apéndice B - Definiciones

- 1- **Pistas** - Una pista es una franja de terreno llano, duro o pavimentado, en la que los aviones pueden despegar o aterrizar. Las pistas pueden ser construidas en tierra/césped, grava, asfalto u hormigón. Los aeropuertos comerciales por lo general utilizan pistas de asfalto u hormigón. Los aeropuertos pueden tener una o varias pistas utilizadas simultáneamente o de forma individual.
2. **Calles de rodaje** - Las calles de rodaje son una franja de terreno llano compactado o pavimentado, al igual que las pistas, a lo largo de la cual los aviones ruedan desde la pista hasta una posición de aparcamiento (y viceversa) o de una parte del aeropuerto a otro.
3. **Áreas de almacenamiento temporero**- Ubicadas cerca de los extremos de las pistas o cerca del edificio terminal, las áreas de almacenamiento, son de diferentes formas y tamaños y tienen por objetivo proporcionar un área de espera fuera del sistema de calles de rodaje para las aeronaves que deben esperar hasta estar listo para despegar o hasta que una puerta esté disponible.
4. **Plataformas** - Áreas de terreno destinadas a alojar a las aeronaves estacionadas con el propósito de abastecimiento de combustible, mantenimiento, y/o el desembarque y embarque de pasajeros o carga. Las áreas de plataforma normalmente rodean a los edificios, tales como terminales y hangares, pero también pueden ser diseñados específicamente para almacenar los aviones a la intemperie utilizando amarres. Grandes plataformas pueden incluir calles de acceso. La combinación del área de plataforma con las calles de acceso se denomina *área de no movimiento*.
5. **Regla de Vuelo Visual (VFR)** – Condición de vuelo en la que la aeronave depende primordialmente de ver y ser vista en el cumplimiento del principio de separación de aeronaves en vuelo. Vuelos en condición VFR son realizados mayormente por aviones pequeños.
6. **Regla de Vuelo por Instrumentación (IFR)** – Condición de vuelo de un avión en la que la separación mínima necesaria entre aeronaves en vuelo se provee mediante los radares de control de tráfico aéreo. Los pilotos en vuelos IFR deben presentar planes de vuelo para recibir separaciones garantizadas del radar y poder operar en ciertos espacios aéreos controlados.

7. **Operación toca y fuera (*touch and go*)** – Operación en la que la aeronave aterriza y despega de forma continua sin detenerse por completo ni salir de la pista.
8. **Zona Terrestre** – Área de un aeropuerto que se compone de todos los elementos y procesos necesarios para que los pasajeros o visitantes tengan acceso al edificio terminal del aeropuerto. Las calles de circulación, estacionamiento y áreas de carga y descarga de pasajeros son ejemplo de elementos y procesos de esta zona.
9. **Zona Terminal** - Punto de transferencia de pasajeros y equipaje de la zona terrestre a la zona aérea de un aeropuerto. Se caracteriza por los procesos de registro, entrega de equipaje, revisión de seguridad y reclamo de equipaje de pasajeros entre otros.
10. **Zona Aérea** - compuesta por los elementos necesarios para la operación y estacionamiento de aviones. Es la zona que regularmente limita la capacidad de un aeropuerto.

Apéndice C – Proceso de selección de distribuciones por proceso muestreado

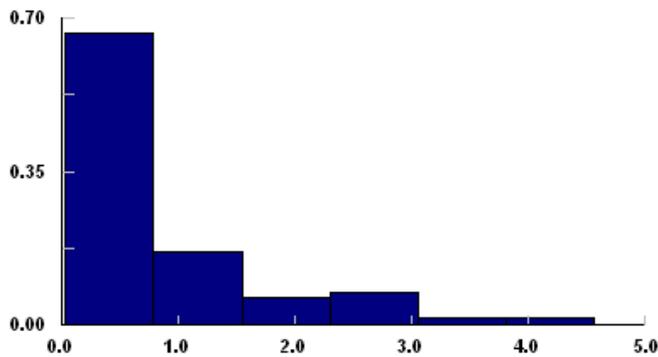
I. Registro de pasajeros con empleado

1. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo de llegadas

a) Estadística descriptiva – Registro completo con empleado

data points	66
minimum	0.033
maximum	4.567
mean	0.817106
median	0.5415
mode	0.3335
standard deviation	0.872144
variance	0.760634
coefficient of variation	106.736
skewness	1.98788
kurtosis	4.24688

b) Histograma: Tiempo entre Llegadas – Registro completo con empleado

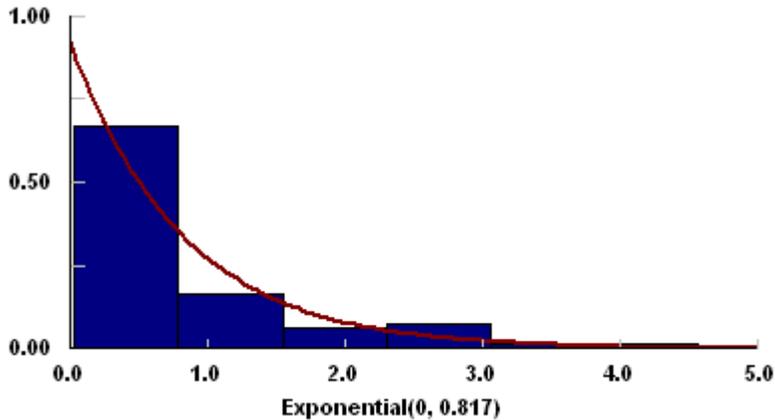


c) Bondad de ajuste de las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.63	0.629	0.593	No rechazada
Exponential	0.658	0.638	0.613	No rechazada
Gamma	0.576	0.63	0.564	No rechazada
Log-Logistic	0.823	0.891	0.753	No rechazada
Lognormal	0.576	0.669	0.55	No rechazada
Normal	0	0.004	0.0023	Rechazada
Triangular	0	0	0	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.576	0.624	0.606	No rechazada

Se selecciona la distribución exponencial ya que, aunque no es la distribución que mayor valor de 'p' muestra, es la distribución que mejor representa los datos de tiempo entre llegadas para una simulación.

d) Ajuste de distribución exponencial

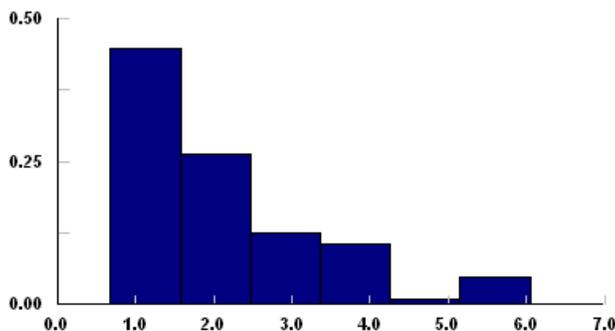


2. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo servicio de pasajeros

a) Estadística descriptiva

data points	103
minimum	0.68
maximum	6.05
mean	2.09682
median	1.65
mode	1.65
standard deviation	1.23437
variance	1.52368
coefficient of variation	58.8689
skewness	1.37944
kurtosis	1.48906

b) Histograma

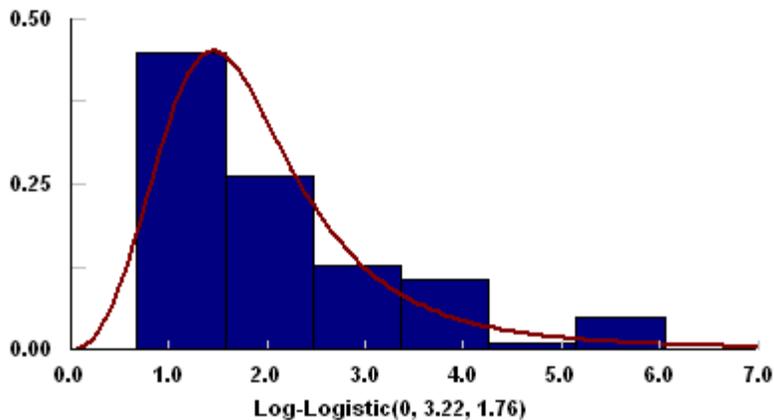


c) Bondad de ajuste de las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.0449	0.0182	0.139	No Rechazada
Erlang	0.113	0.00858	0.0765	No Rechazada
Exponential	0	0	0	Rechazada
Gamma	0.0562	0.0186	0.136	Rechazada
Log-Logistic	0.0311	0.278	0.429	Rechazada
Lognormal	0.0671	0.129	0.462	No rechazada
Normal	0	0	0	Rechazada
Triangular	0	0	0	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.00327	0.0109	0.0502	No Rechazada

La distribución log-normal y la log-logistic son las que mayor valor de p presentan en las diferentes pruebas de bondad de ajuste. Sin embargo, la distribución log-logistic muestra un valor mayor de p marcado en la prueba K.S., y tomando en cuenta que se tomaron más de 100 datos para esta prueba, se utiliza esta distribución para representar el proceso de servicio en el registro completo de pasajeros por un empleado de la aerolínea en el terminal A del aeropuerto SJU.

d) Ajuste de distribución log-logistic para tiempo de servicio de Registro completo



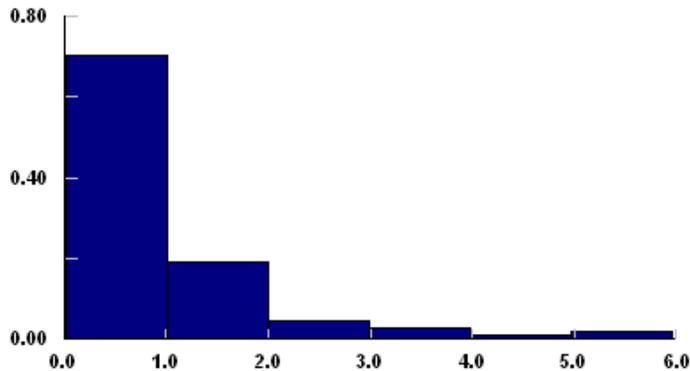
II. Registro en kioscos (máquinas de auto-registro)

1. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo de llegada entre pasajeros

a) Estadística Descriptiva

data points	105
minimum	0.016667
maximum	5.96667
mean	0.902698
median	0.533333
mode	0.233333
standard deviation	1.05132
variance	1.10527
coefficient of variation	116.464
skewness	2.47055
kurtosis	7.36911

b) Histograma

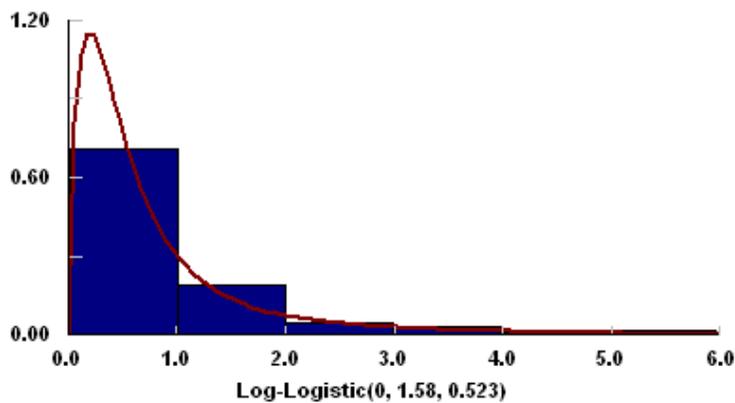


c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribucion	P value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.000147	0.208	0.237	Rechazada
Erlang	0.326	0.275	0.266	No rechazada
Exponential	0.326	0.275	0.266	No rechazada
Gamma	0.14	0.209	0.237	No rechazada
Log-Logistic	0.134	0.504	0.703	No rechazada
Lognormal	0.216	0.763	0.871	No rechazada
Normal	0	0.000164	0	Rechazada
Triangular	0	0	0	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.338	0.404	0.3	No rechazada

Se selecciona la distribución exponencial ya que, aunque no es la distribución que mayor valor de 'p' muestra, es la distribución que mejor representa datos de tiempo entre llegadas para una simulación desarrollada. La distribución log-normal resulta con parámetros negativos los cuales no pueden ser utilizados para la simulación.

d) Ajuste de distribución Log-logistic

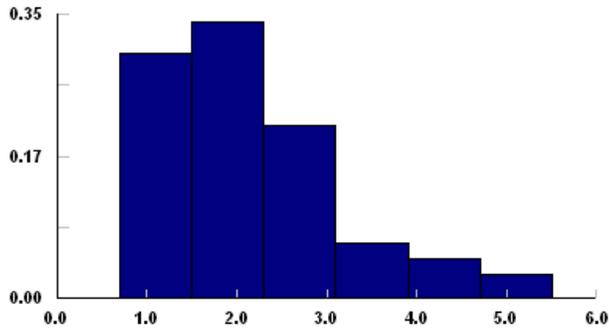


2. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo de servicio

a) Estadística descriptiva

data points	103
minimum	0.7
maximum	5.5
mean	2.15421
median	1.9
mode	1.55833
standard deviation	1.02391
variance	1.04839
coefficient of variation	47.5306
skewness	1.21757
kurtosis	1.32818

b) Histograma

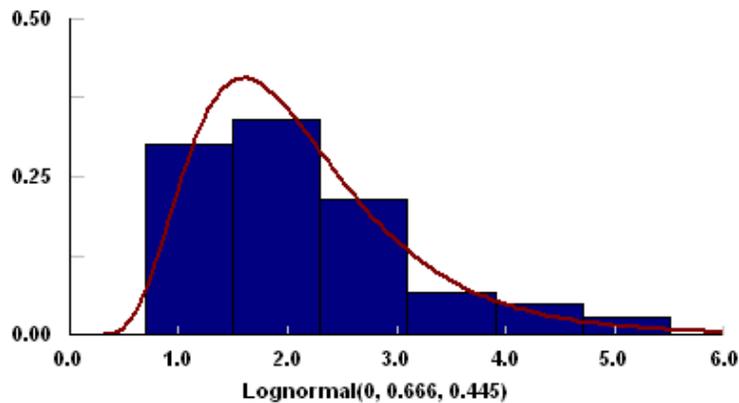


c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.423	0.277	0.00137	No rechazada
Erlang	0.845	0.43	0.635	No rechazada
Exponential	0	0	0	Rechazada
Gamma	0.845	0.387	0.613	No rechazada
Log-Logistic	0.812	0.733	0.941	No rechazada
Lognormal	0.944	0.746	0.991	No rechazada
Normal	0.0326	0.114	0.392	No Rechazada
Triangular	0.284	0.0255	0.00798	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.209	0.413	0.149	No Rechazada

La distribución Log-normal es la que mejor representa los datos de servicio del auto-registro de pasajeros en Kioscos en el Terminal A del aeropuerto SJU debido a que muestra el mayor valor de p en las pruebas de bondad y ajuste.

d) Ajuste de distribución Lognormal



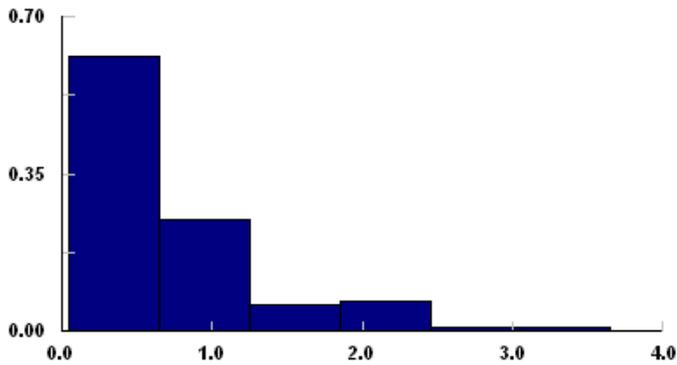
III. Entrega de equipaje

1. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo entre llegadas

a) Estadística descriptiva

data points	105
minimum	0.05
maximum	3.65
mean	0.670476
median	0.383333
mode	0.116667
standard deviation	0.686812
variance	0.471711
coefficient of variation	102.436
skewness	1.78983
kurtosis	3.31257

b) Histograma



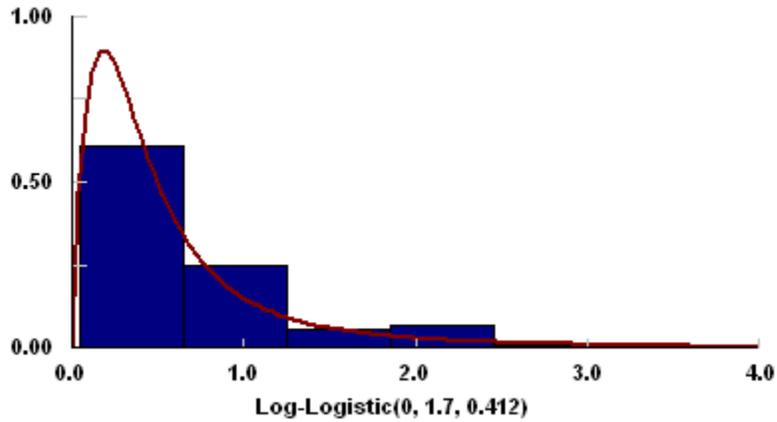
c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0	0.0848	0.0825	No Rechazada
Erlang	0.0744	0.0492	0.129	No rechazada
Exponential	0.0744	0.0492	0.129	No rechazada
Gamma	0.604	0.0849	0.0827	No rechazada
Log-Logistic	0.109	0.289	0.186	No rechazada
Lognormal	0.14	0.253	0.226	No rechazada
Normal	0	0.000686	0	Rechazada
Triangular	0	0	0	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.744	0.143	0.108	No rechazada

La distribución Log-logistic, aunque no es la que mayor valor de p que presenta en las pruebas, es la que mejor que representa los datos en la simulación ya que la distribución

lognormal posee parámetros negativos los cuales no pueden utilizarse en una simulación. Por lo tanto se utilizará la distribución log-logistic para representar en la simulación la distribución de llegadas para entrega de maletas en el terminal A del aeropuerto SJU.

d) Ajuste de distribución

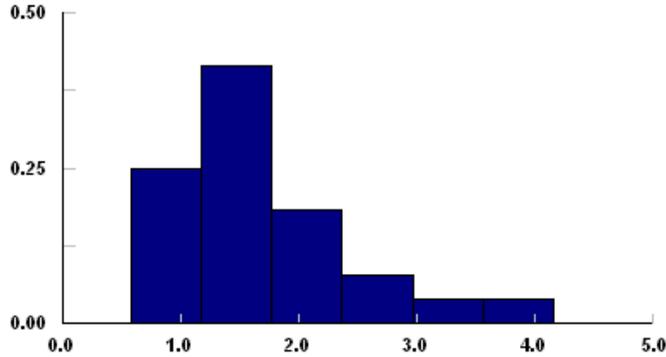


2. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo servicio

a) Estadística descriptiva

data points	104
minimum	0.583333
maximum	4.15
mean	1.69756
median	1.575
mode	1.15833
standard deviation	0.759239
variance	0.576444
coefficient of variation	44.7254
skewness	1.22899
kurtosis	1.31168

b) Histograma

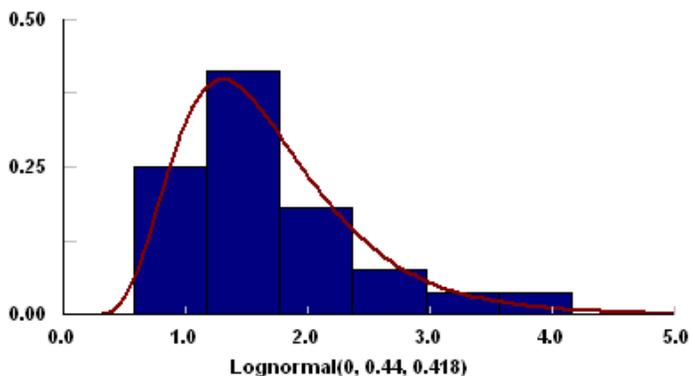


c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.517	0.42	0.462	No Rechazada
Erlang	0.583	0.503	0.457	No Rechazada
Exponential	0	0	0	Rechazada
Gamma	0.517	0.487	0.483	Rechazada
Log-Logistic	0.942	0.854	0.959	No rechazada
Lognormal	0.811	0.894	0.934	No rechazada
Normal	0.014	0.0415	0.264	Rechazada
Triangular	0	0.00405	0.0086	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.0632	0.104	0.0808	No Rechazada

La distribución Lognormal es la que mayor valor de p presenta en la prueba de K.S. y por lo tanto se utilizará para representar el servicio de pasajeros para el proceso de entrega de maletas.

d) Ajuste de distribución



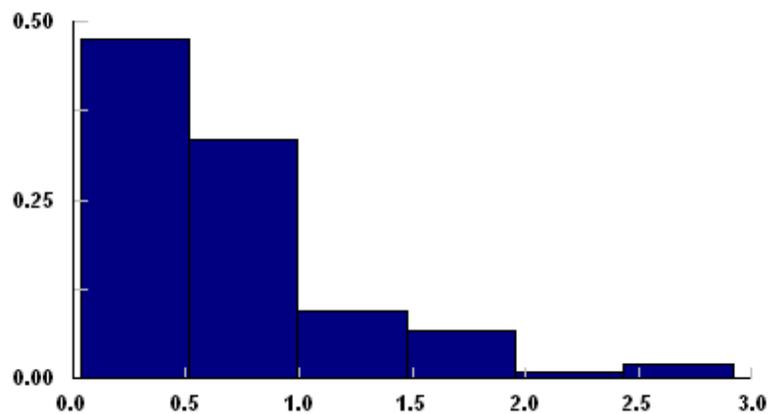
IV. *Revisión de seguridad*

1. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo entre llegadas

a) Estadística descriptiva

data points	105
minimum	0.0333333
maximum	2.91667
mean	0.656667
median	0.55
mode	0.191667
standard deviation	0.558943
variance	0.312418
coefficient of variation	85.1183
skewness	1.63255
kurtosis	3.06992

b) Histograma

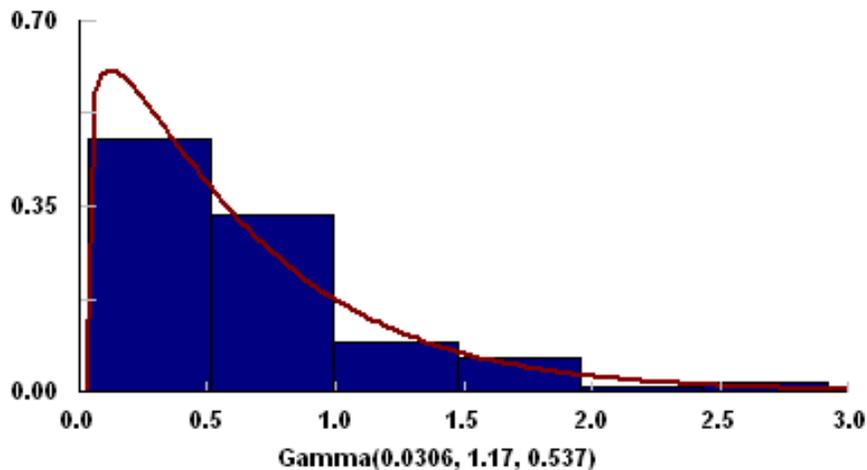


c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.796	0.907	0.975	No rechazada
Erlang	0.234	0.321	0.141	No rechazada
Exponential	0.234	0.321	0.141	No rechazada
Extreme Value	0.57	0.393	0.291	No rechazada
Gamma	0.796	0.905	0.975	No rechazada
Inverse Gaussian	0.0245	0.0176	0.0425	Rechazada
Logistic	0.0128	0.053	0.0541	Rechazada
Log-Logistic	0.326	0.481	0.555	No rechazada
Lognormal	0.587	0.262	0.452	No rechazada
Normal	0	0.0171	0.0082	Rechazada
Pareto	No fit			
Pearson 5	0.00726	0.0121	0.0121	Rechazada
Pearson 6	0.796	0.911	0.981	No rechazada
Triangular	0	0	0	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0.813	0.762	0.933	No rechazada

Debido a que la distribución Gamma es la que más se ajusta a los datos tomados se escoge esta distribución para representar los datos (mayor valor de p).

d) Ajuste de la distribución

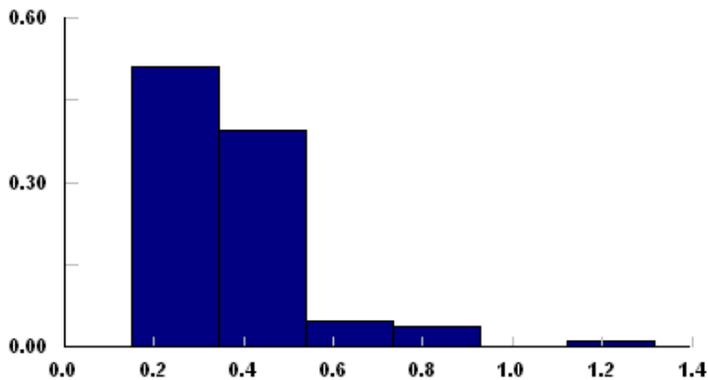


2. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo de servicio de pasajeros (Revisión de documentos)

a) Estadística descriptiva

data points	104
minimum	0.15
maximum	1.31667
mean	0.374225
median	0.336111
mode	0.333333
standard deviation	0.165601
variance	0.0274237
coefficient of variation	44.2516
skewness	2.41142
kurtosis	9.20814

b) Histograma

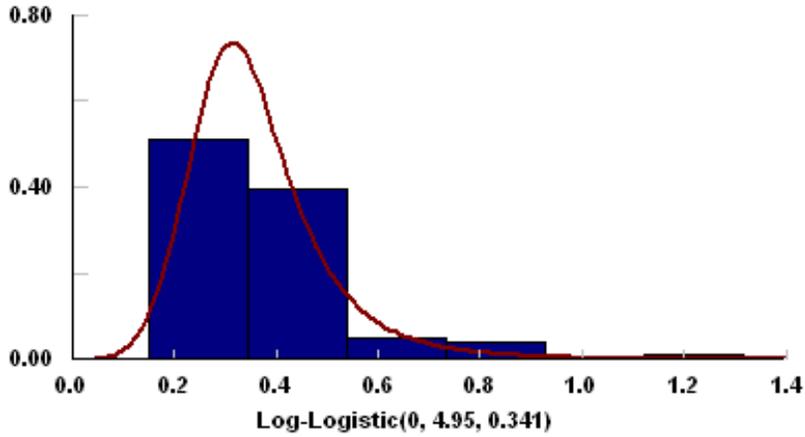


c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	.125	0.201	0.0093	No Rechazada
Erlang	0.221	0.22	0.153	No Rechazada
Exponential	0	0	0	Rechazada
Gamma	0.221	0.219	0.152	Rechazada
Log-Logistic	0.971	0.622	0.84	No Rechazada
Lognormal	0.6	0.469	0.513	No Rechazada
Normal	0	0.00908	0.00443	Rechazada
Triangular	0	0	0	Rechazada
Uniform	0	0	0	Rechazada
Weibull	0	0.0236	0.00698	Rechazada

La distribución Log-logistic es la que mejor representa los datos de servicio del registro completo de pasajeros en el Terminal A del aeropuerto SJU. (mayor valor de p)

d) Ajuste de la distribución

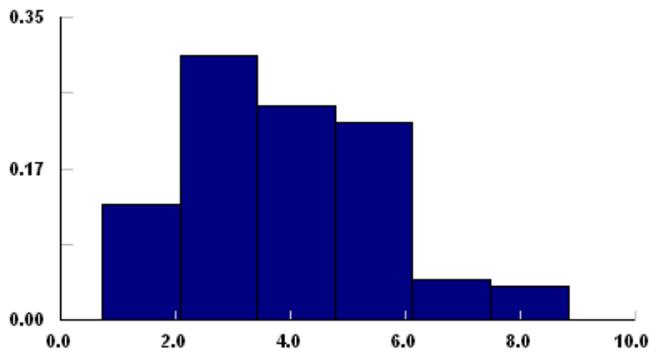


3. Bondad de ajuste de distribución para los datos obtenidos para el tiempo de servicio de pasajeros (Revisión de pasajeros y pertenencias)

a) Estadística descriptiva

data points	105
minimum	0.725
maximum	8.81667
mean	3.92886
median	3.8
mode	2.80833
standard deviation	1.71862
variance	2.95366
coefficient of variation	43.7435
skewness	0.473841
kurtosis	-0.2011

b) Histograma



c) Bondad de ajuste para las distribuciones analizadas

Distribución	P-value			Resultado
	Chi-Square	Kolmogorof Smirnov	Anderson Darling	
Beta	0.674	0.926	0.971	No rechazada
Erlang	0.489	0.759	0.824	No rechazada
Exponential	0	0	0	Rechazada
Gamma	0.489	0.787	0.852	No rechazada
Log-Logistic	0.363	0.729	0.471	No Rechazada
Lognormal	0.146	0.519	0.429	No Rechazada
Normal	0.537	0.61	0.597	No rechazada
Weibull	0.796	0.888	0.947	Rechazada

Se escoge la distribución Gamma ya que, aunque la distribución Beta es la que mayor valor de p muestra en todas las pruebas. La distribución Gamma muestra un comportamiento más acertado a la realidad en el modelo de simulación.

d) Ajuste de la distribución

