

El impacto de los pronósticos de demanda en la gestión de capacidad de pista

Diana Tascón Hoyos¹, Oscar Díaz Olariaga^{2*}

¹Facultad de Ciencias y Tecnologías; ²Facultad de Ingeniería Civil; Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia.

*OscarDiazOlariaga@usantotomas.edu.co

Presentación: Oral

Área temática (seleccione una opción):

- | | |
|---|---|
| ☐ Economía del transporte | ☐ Transporte multimodal y logística de mercancías |
| ☐ Infraestructura del transporte | ☐ Transporte, ambiente y ciudad |
| ☐ Modelación y sistemas inteligentes de transporte | ☐ Tránsito y accesibilidad del transporte |
| ☐ Planificación y políticas de transporte | ☒ Modos generales y temas transversales al transporte |
| ☐ Seguridad Vial | |

INTRODUCCIÓN

El ininterrumpido crecimiento del tráfico aéreo en Colombia ha venido reforzado desde la década de 1990 por una política pública de liberalización del espacio aéreo, y por el re-direccionamiento de la inversión pública y privada hacia la modernización de las infraestructuras aeroportuarias. Las políticas públicas del sector aéreo condujeron a que en las últimas dos décadas y media el transporte de pasajeros en Colombia creció un 863%. Este importante índice de crecimiento ha sido impulsado y liderado por el principal aeropuerto del país, el Aeropuerto de Bogotá-El Dorado (en adelante BOG). Pero algunos informes técnicos estiman que el aeropuerto llegará a su máxima capacidad a corto plazo principalmente por su imposibilidad de ampliar su campo de vuelo (actualmente dos pistas). Debido a esta circunstancia, la autoridad pública aeronáutica de Colombia dio curso a la planificación, diseño y construcción de nuevo aeropuerto (complementario) a las afueras de la ciudad de Bogotá, el cual se estima entrará en operaciones en 2025/2026. Entonces, se estima oportuno, y de gran interés, el desarrollo de una prognosis de tráfico para BOG a corto plazo y evaluar el impacto de la demanda futura en la capacidad de pista del aeropuerto. Entonces, y debido a la complejidad del pronóstico del transporte aéreo, el uso de la técnica de Dinámica de Sistemas se considera apropiada como metodología para la presente investigación debido a que con la misma se puede desarrollar un modelo para pronosticar la demanda de operaciones y evaluar algunos escenarios relacionados con la capacidad de la pista de BOG. Básicamente, una vez definidas un conjunto de variables de nivel, de flujo y parámetros que se deben incluir en el modelo se definirán los límites del modelo, los subsistemas, las estructuras de causalidad y los flujos de niveles, con lo que se procede a cuantificar el modelo y simular escenarios, los cuales harán referencia a política de incremento de capacidad de pista en el aeropuerto objeto del caso de estudio. Para que de esta manera, y acorde con los principios de la Dinámica de Sistemas, se logre una mejor comprensión de la conducta del sistema y como ésta emerge desde las interacciones de sus actores a través del tiempo, descubrir los procesos de realimentación que hipotéticamente están detrás de los patrones de conducta observados, identificar las relaciones de flujo y acumulaciones, reconocer demoras y develar comportamientos de carácter no lineal. Los datos para la investigación se obtienen de la autoridad pública aeronáutica de Colombia (en adelante Aerocivil).

METODOLOGÍA

Enfoque y referentes metodológicos

Este artículo busca evaluar el impacto que tienen los pronósticos de demanda (para el caso de operaciones aéreas), sobre la gestión de la capacidad de pista, tomando como caso de estudio el Aeropuerto Internacional El Dorado, en Bogotá, Colombia. La situación descrita se abordó con el uso de simulación bajo el enfoque de Dinámica de Sistemas.

Suryani et al. (2010), propusieron un modelo de Dinámica de Sistemas, que se tomó como referente para el propósito descrito. Los autores pronostican y analizan la demanda de pasajeros aéreos con el ánimo de evaluar los requerimientos futuros de capacidad de pista, así como los de la terminal de pasajeros para el aeropuerto internacional de Taiwan Taoyuan (TTIA). El uso de Dinámica de Sistemas les permitió desarrollar un modelo para pronosticar la demanda de pasajeros aéreos y así, evaluar algunos escenarios de expansión de la capacidad de pista.

Dinámica de Sistemas incorpora un conjunto de herramientas que permiten comprender entornos complejos; utiliza instrumentos, que como los diagramas de causalidad, fomentan el pensamiento sistémico entre los administradores de los procesos, capturan la complejidad dinámica de un sistema dado y proporcionan la considerable ventaja de simular el modelo para evaluar los resultados de interacción y así, anticipar los efectos colaterales a largo plazo de las políticas antes de su implementación (Stermán, 2000).

El uso de Dinámica de Sistemas, en el modelado y la simulación de sistemas complejos, implica la ejecución de un conjunto de tareas que se sintetizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tareas, métodos y productos derivados

Tarea	Método	Producto
Definición y estructuración del comportamiento dinámico del sistema.	Se centra en la definición y elaboración de un mapeo del sistema que involucra de los siguientes elementos: -Límites del modelo -Subsistemas -Estructuras de causalidad -Flujos y niveles	Mapeo conceptual
Cuantificación del modelo	La cuantificación implica: -Definición de las normas de decisión que rigen el sistema. -Estimación de parámetros, correlaciones y condiciones iniciales. -Ejecución de pruebas de consistencia	Modelo cuantificado
Simulación de escenarios	-Simulación y análisis del comportamiento de las variables de respuesta	Resultados de la simulación y su análisis

Fuente: Tascón, 2017.

En general, la utilización de la pista depende de la demanda (de vuelos, regulares y no regulares) que se ven afectados por factores externos e internos. La demanda de transporte aéreo tiende a evolucionar en función de los cambios de precios y las condiciones económicas. Según Suryani et al. (2012) hay varios factores que afectan la demanda de viajes aéreos, que son básicamente factores socio-económicos y demográficos.

Definición y estructuración del comportamiento dinámico del sistema

En el modelo desarrollado, el análisis se centrará en el impacto de los pronósticos de demanda en la gestión de la capacidad de pista de la terminal área, por lo que se decidió trabajar el pronóstico directamente en términos de demanda de operaciones (atterrizajes y despegues), para lo que se tomaron datos y estadísticas provenientes de la Aerocivil (2019b), los datos socio-económicos de obtuvieron de Banco de la República de Colombia (2019) y DANE (2019).

Inicialmente se partió de un conjunto de variables (tanto de respuesta como de entrada), que se consideran típicamente relevantes para el pronóstico en desarrollo, así, un análisis preliminar constó en determinar la correlación entre estas variables, obteniendo los resultados mostrados en Tabla 2.

Tabla 2. Índices de correlación entre variables preliminares.

	Total de operac.	Año	Mes	PIB (miles de millones, COP)	PIB per cápita (COP)	Población	Índice Producción Industrial (IPI)	Total expo. (millones USD)	Total impo. (millones USD)	IPC	TRM (COP)
Total de operaciones	1,00										
Año	0,93	1,00									
Mes	0,09	0,00	1,00								

	Total de operac.	Año	Mes	PIB (miles de millones, COP)	PIB per cápita (COP)	Población	Índice Producción Industrial (IPI)	Total expo. (millones USD)	Total impo. (millones USD)	IPC	TRM (COP)
PIB (miles de millones, COP)	0,91	0,99	0,00	1,00							
PIB per capita (COP)	0,91	0,99	0,00	1,00	1,00						
Población	0,92	1,00	0,00	0,99	0,99	1,00					
Indice Producción Industrial (IPI)*	0,85	0,93	0,00	0,91	0,92	0,94	1,00				
Total export.(millones USD)*	0,82	0,76	0,00	0,70	0,72	0,76	0,78	1,00			
Total import. (millones USD)*	0,91	0,88	0,00	0,84	0,85	0,88	0,86	0,96	1,00		
IPC*	0,90	1,00	0,00	0,99	1,00	1,00	0,94	0,73	0,84	1,00	
TRM* (COP)	0,06	0,17	0,00	0,25	0,22	0,17	-0,01	-0,41	-0,17	0,20	1,00

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las variables que se miden en unidades monetarias están dadas, bien sea en pesos corrientes colombianos (COP), o dólares americanos (USD), según está establecido en la denominación.

Concentrándonos en la variable a pronosticar en el modelo, es decir la demanda por operaciones, se seleccionaron en aquellas de mayor impacto, este teniendo en cuenta que si algunas variables eran altamente explicadas por otras, se incluiría solo la más representativa en términos de la variable de repuesta para así simplificar el modelo y evitar redundancias. Como conclusión de este análisis, de los indicadores socio-económicos analizados se incorporaran los enunciados en la Tabla 3.

Tabla 3. Indicadores socio-económicos a incluir en la modelación

Indicadores
PIB per cápita (COP)
Total exportaciones (millones USD)
Total importaciones (millones USD)
IPC (Índice de precios al consumidor)
TRM (Tasa Representativa del Mercado, COP)

Fuente: Elaboración propia

Aun cuando se observa una baja correlación entre las operaciones ejecutadas en pista y la TMR, dado que es una variable relevante para el caso estudiado de manera conceptual permanecerá en la modelación. En la Tabla 3, se especifican las variables contempladas en la modelación, junto con su tipo (acorde con Dinámica de Sistemas), la fuente (si aplica) y algunas observaciones.

Tabla 4. Variables y parámetros del modelo

Variable/Parámetro	Tipo	Observaciones / fuente
Capacidad de operaciones en pista	Parámetro	Datos históricos
Año	Auxiliar	Cuenta los años de operación que están siendo simulados
Demanda de operaciones/mes	Auxiliar	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
Factor de utilización de la capacidad de pista	Auxiliar	Ecuación del modelo

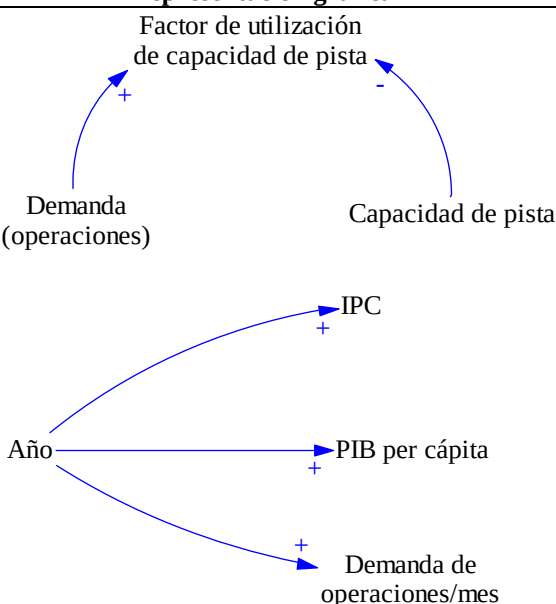
Variable/Parámetro	Tipo	Observaciones / fuente
PIB per cápita (COP)	Auxiliar	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
Total exportaciones (millones USD)	Auxiliar	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
Total importaciones (millones USD)	Auxiliar	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
IPC (Índice de precios al consumidor)	Auxiliar	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
TRM (Tasa Representativa del Mercado, COP)	Auxiliar	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
Pistas requeridas	Nivel	Ecuación del modelo, construida a partir de datos históricos
Factor pistas requeridas	Auxiliar	Ecuación del modelo
Incremento de pistas requeridas	Flujo	Ecuación del modelo

Fuente: Elaboración propia

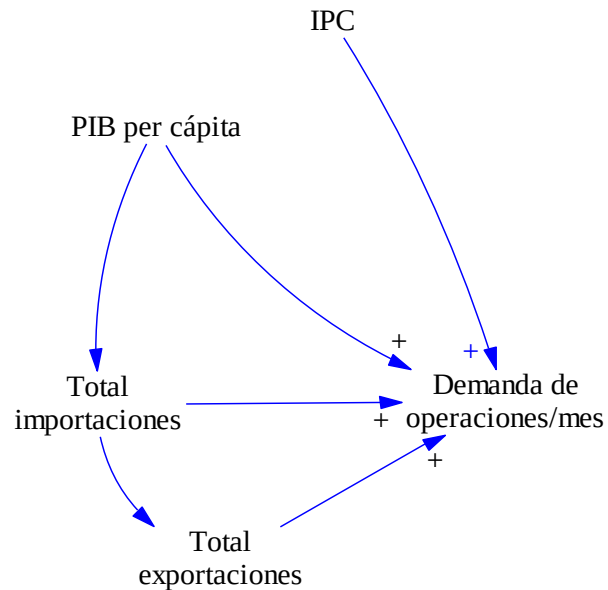
Mapeo conceptual del modelo

Haciendo uso de diagramas de causalidad incorporados en el enfoque de Dinámica de Sistemas, se procede a proponer las relaciones que existen entre las variables que se decidió estarían dentro de los alcances del modelo. En este sentido, la Tabla 5 contiene la descripción de algunas de las relaciones de causalidad incluidas en el modelo.

Tabla 5. Representación específica de algunas relaciones y ciclos de realimentación del modelo

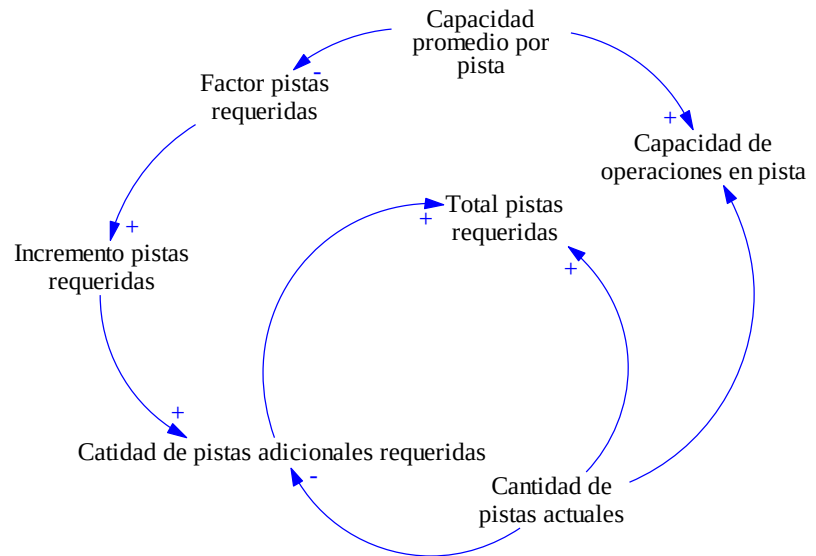
Tipo de relación	Representación gráfica
Esta fracción del mapeo conceptual del sistema indica que conforme la demanda de operaciones en pista el factor de utilización de capacidad de pista aumentaría, en tanto que para una demanda dada, un incremento en la capacidad de pista implicaría un decremento en el factor de utilización Acá se representan la influencia que tiene el transcurrir del tipo con variables como el IPC, el PIB per cápita y la demanda de operaciones; que es incremental para estos casos.	 <pre> graph TD D[Demanda (operaciones)] -- "+" --> F[Factor de utilización de capacidad de pista] F -- "-" --> C[Capacidad de pista] C -- "-" --> D A[Año] -- "+" --> IPC[IPC] A -- "+" --> PIB[PIB per cápita] A -- "+" --> DO[Demanda de operaciones/mes] </pre>

En esta fracción del mapeo conceptual se hace énfasis en variables que impactan la demanda de operaciones mensuales, se enuncia que un incremento en cualquiera de las variables allí enunciadas supondría un incremento en la demanda.



Por último se develan en esta parte del diagrama de causalidad relaciones como:

La cantidad de pistas adicionales requerida aumentaría si disminuyeran las pistas actuales, asimismo, el factor de pistas requeridas aumenta en caso de que se establezca una menor capacidad promedio por pista.



Fuente: Elaboración propia

Cuantificación del modelo

Los datos tomados como insumo principal para cuantificar el modelo están comprendidos entre enero de 2000, lo que en la simulación corresponde al periodo 1, y diciembre de 2017, que en la simulación corresponde al periodo 216. Se contemplaron las operaciones (tanto llegadas como salidas o aterrizajes y despegues), que involucran al aeropuerto caso de estudio (El Dorado de Bogotá), se tomaron referentes como la capacidad de operaciones del aeropuerto.

El diagrama de flujos y niveles sobre el que se realizó la cuantificación del modelo se muestra en la Ilustración 1.

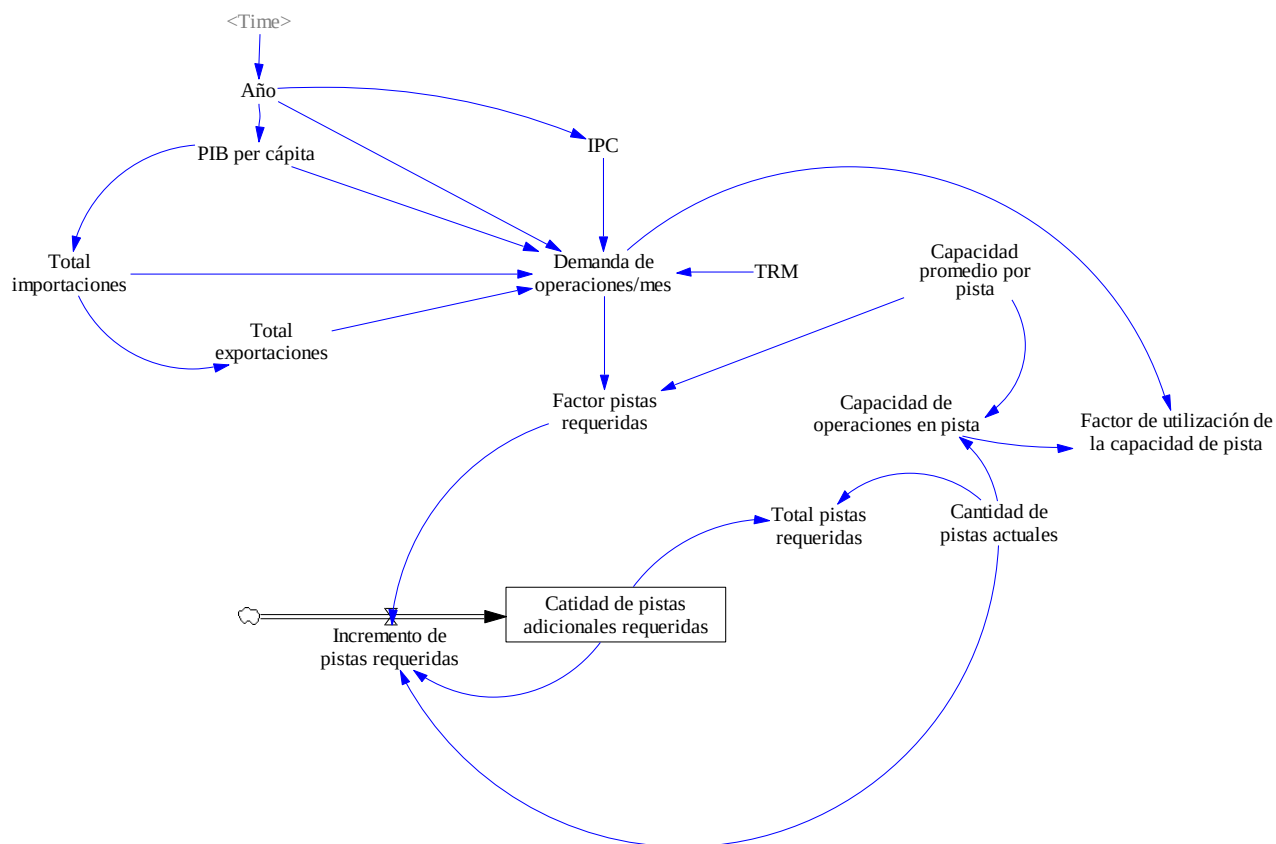
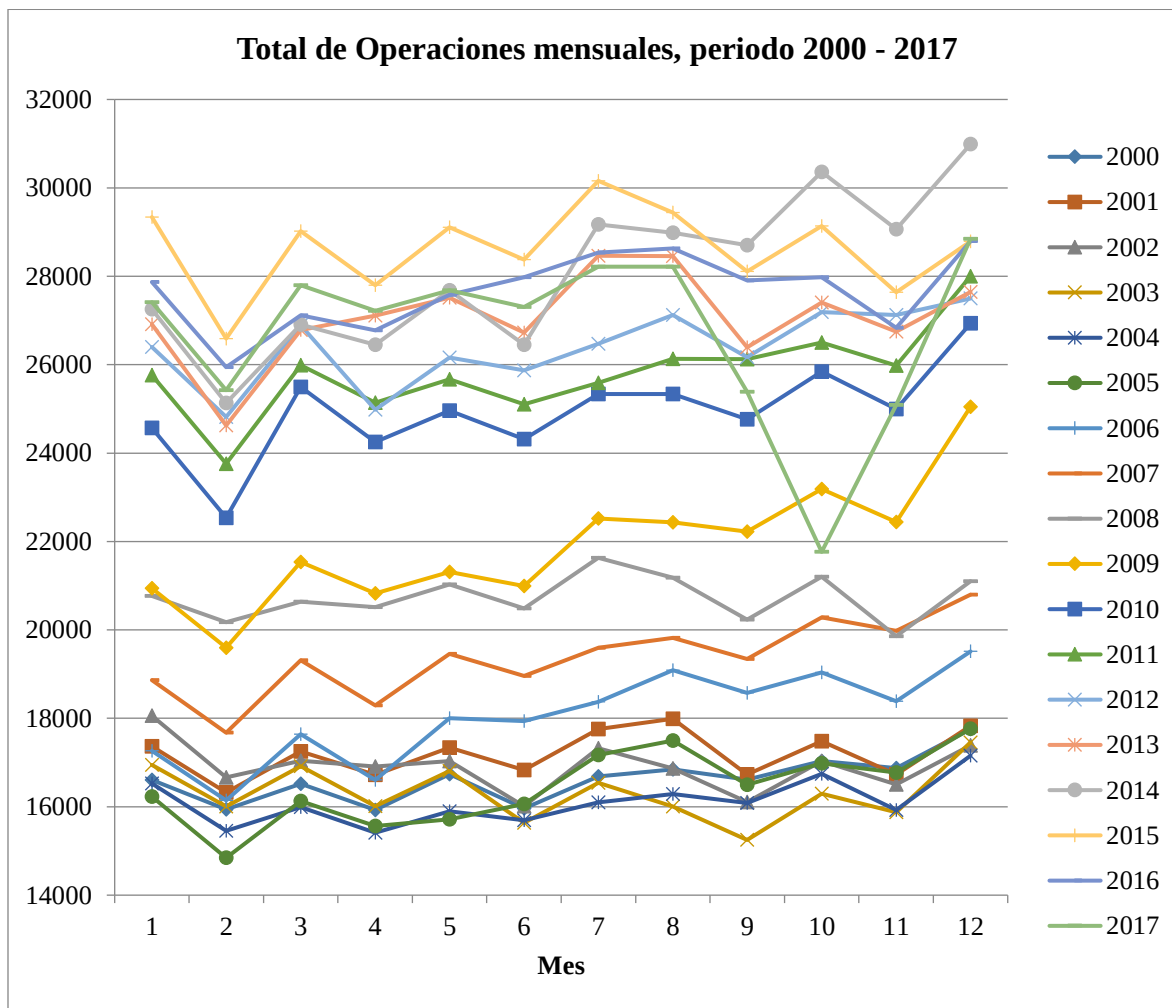


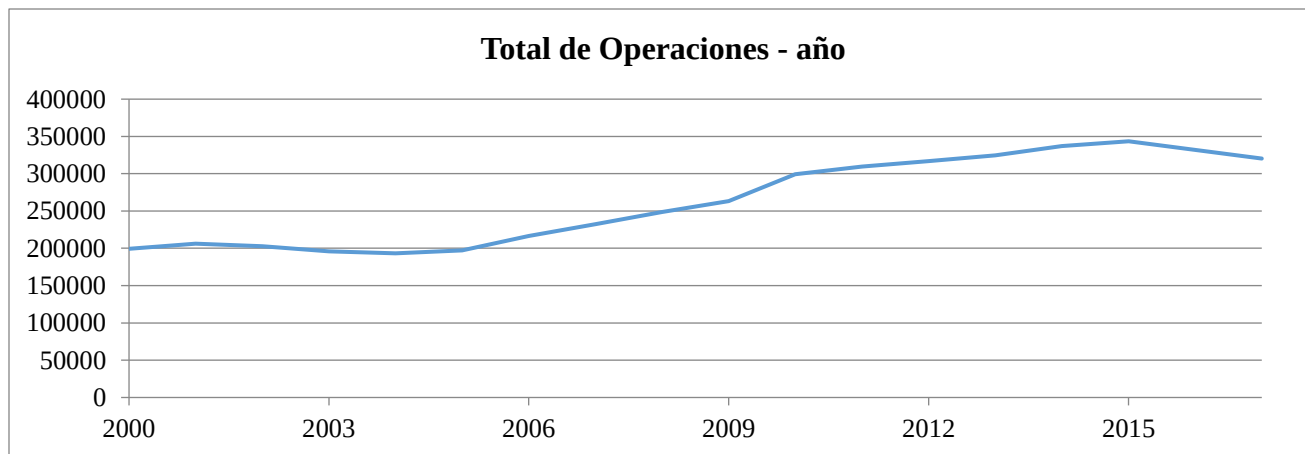
Ilustración 1. Diagrama de flujos y niveles. Fuente: Elaboración propia

Los datos de capacidad de operaciones en pista provienen de Aerocivil (2014), corresponden a los promedios de capacidad de operación dados en términos anuales y llevados para conveniencia del modelo a sus equivalencias mensuales. Por otro lado, para pronosticar el comportamiento de la demanda de operaciones se cuenta con datos agregados mensualmente desde enero de 2000 hasta diciembre de 2017. El comportamiento de la ejecución total de operaciones mensuales aparece reflejado en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Total de operaciones mensuales entre 2000 y 2017. Fuente: Aerocivil, 2019b.

Ahora, para estudiar una tendencia anual de los datos presentados, se presenta en la gráfica 2, el comportamiento anual de esta variable.

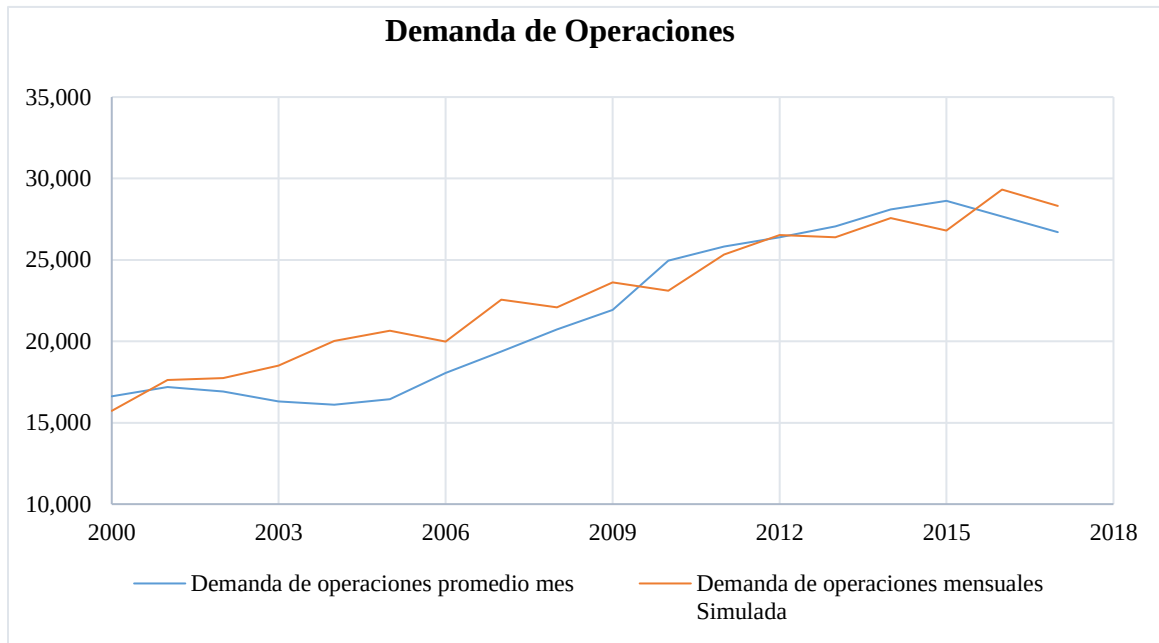


Gráfica 2. Total de operaciones por año entre 2000 y 2017. Fuente: Aerocivil, 2019b

Una vez establecidas las relaciones entre variables y los parámetros de las ecuaciones que las generan, lo cual se hace en la mayoría de los casos mediante regresiones lineales y la definición de reglas de decisión para el modelo, se llega al modelo cuantificado, el cual se desarrolló en Vensim®, software para Dinámica de Sistemas.

RESULTADOS

Al correr el modelo de simulación para el periodo comprendido entre enero de 2000 y diciembre de 2017, se presenta el comportamiento reflejado en las siguientes gráficas.



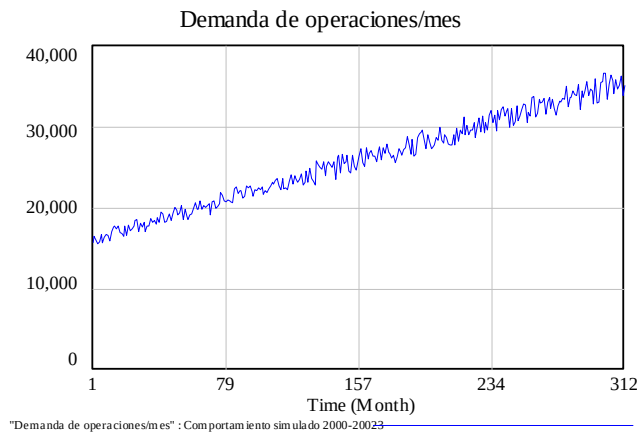
Gráfica 3. Demanda de operaciones

En cuanto a la gestión de capacidad, en la actualidad se cuenta con dos pistas para el desarrollo de la operación del Aeropuerto el Dorado, en aras de identificar el comportamiento en términos de la capacidad requerida se muestra para finalizar una simulación tanto de retrospectiva (lo sucedido entre 2000 y 2017), y una proyección de cinco años adicionales, es decir lo que correría entre enero de 2018 (periodo 217 de la simulación), y diciembre de 2023, lo que corresponde al periodo 312 de la simulación, que se lleva a cabo e intervalos mensuales.

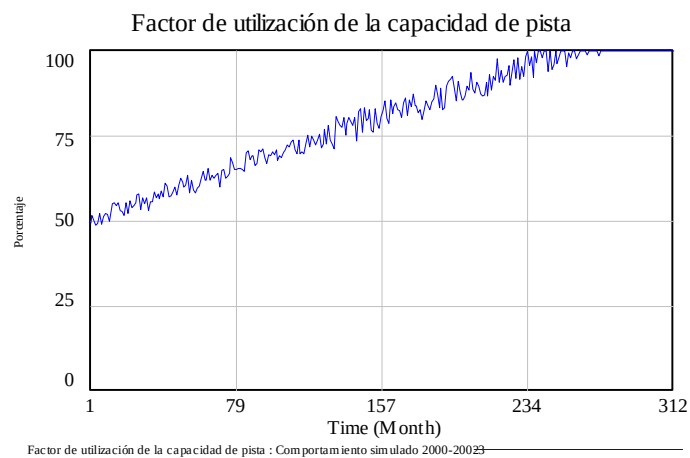
Los resultados para las variables de mayor interés en estas instancias. A saber:

- ✓ Demanda de operaciones/mes
- ✓ Factor de utilización de la capacidad de pista
- ✓ Total de pistas requeridas

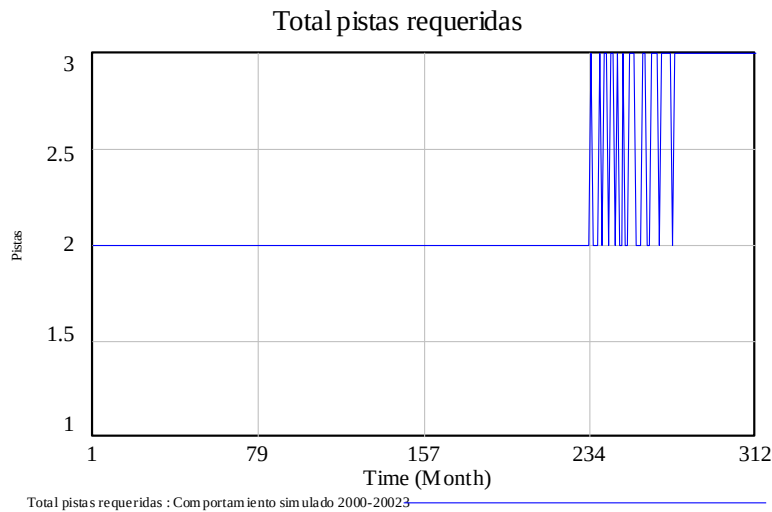
Son mostrados en las gráficas 4, 5 y 6.



Gráfica 3. Demanda de operaciones simulada 2000-2023.



Gráfica 5. Factor de utilización (%) de la capacidad.



Gráfica 6. Cantidad de pistas requeridas.

CONCLUSIONES

A través del uso de un modelo de Dinámica de Sistemas se ha podido analizar el comportamiento de la demanda de operaciones en pista asociadas al transporte aéreo (aterizajes y despegues) en un mercado liberalizado de alto crecimiento. La simulación da indicios de una necesidad de expansión del aeropuerto caso de estudio después de mediados de 2019, donde el factor de uso de la capacidad actual ronda el 100% y se empiezan a requerir entre dos y tres pistas para el normal funcionamiento de la operación.

REFERENCIAS

- Aerocivil (2014). *Actualización del Plan Maestro del Aeropuerto Internacional El Dorado*. Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia.
- Aerocivil (2019). Declaración de Capacidad Aeropuerto Eldorado, Bogotá - Colombia. Obtenido de Aeronáutica Civil, Unidad Administrativa Especial, 2-3.
- Aerocivil (2019b). Estadísticas de transporte aéreo. www.aerocivil.gov.co
- Banco de la República de Colombia (2019). Estadísticas. <http://www.banrep.gov.co/es/-estadisticas>
- DANE (2019). Estadísticas por tema. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema>
- Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics, Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: McGraw-Hill.
- Suryani, E.; Chou, S.; Chen, C. (2012). Dynamic simulation model of air cargo demand forecast and terminal capacity planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 28, 27–41.
- Suryani, E.; Chou, S.; Chen, C. (2010). Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: A system dynamics framework. *Expert Systems with Applications*, 37, 2324–2339.
- Tascón, D. (2017). Modelo Dinámico para Contrastar el Desempeño Ambiental, Social y Económico de Estrategias para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición en Bogotá D.C. <http://hdl.handle.net/11349/6318>