

Simulación de la sostenibilidad del aeropuerto de Málaga basada en la dinámica de sistemas

Ignacio Noguero, Josefa Mula, Francisco Campuzano-Bolarin

<https://doi.org/10.37610/dyo.v0i76.618>

Recibido: 2 de Junio de 2021
Aceptado: 2 de Febrero de 2022

Resumen

Este artículo se basa en la dinámica de sistemas aplicada al estudio del crecimiento del aeropuerto de Málaga. Para ello, basado en datos contrastables y en artículos científicos previos con objetivos similares, se plantea un modelo que contempla la sostenibilidad del aeropuerto de Málaga en términos de factores sociales, económicos y medioambientales, además de otros aspectos propios del aeropuerto. Se formula y valida un modelo de simulación mediante un diagrama de flujo simulado con el software Vensim®. De esta forma, se prevé información útil de la capacidad necesaria del aeropuerto en base al flujo de pasajeros y la congestión del mismo.

Palabras clave

Simulación; dinámica de sistemas; aeropuerto; sostenibilidad.

1. Introducción

Debido a la incertidumbre que se produce en cuanto al desarrollo y la evolución del transporte aeroportuario, se propone modelar y simular los elementos y factores clave de un aeropuerto para obtener información útil en cuanto a la estrategia de crecimiento del mismo. Para ello, se evalúa la sostenibilidad del aeropuerto bajo estudio planteando distintos escenarios sociales, económicos y medioambientales; además, de un escenario basado en la disrupción de la pandemia global de COVID-19, que ha supuesto un decremento drástico de la demanda de pasajeros en los aeropuertos.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es desarrollar una herramienta basada en la simulación de dinámica de sistemas (Forrester, 1961; Sterman, 2000; Campuzano y Mula, 2011; Campuzano et al. 2010, 2013; Mula et al. 2013) capaz de proporcionar información de la

capacidad necesaria del aeropuerto de Málaga en base al flujo de pasajeros y la congestión que se produce. Basado, principalmente, en (He & Wang, 2018) y (Suryani, Chou, & Chen, 2010), que se han tomado como modelos de referencia, se han contemplado nuevos factores sostenibles en términos sociales, económicos y medioambientales que han ampliado el contexto en el que se desarrolla este tipo de transporte. Pese a tener objetivos distintos y a que los aeropuertos no son de dimensiones comparables, se han utilizado las ecuaciones matemáticas que interrelacionaban factores similares a los de los modelos de referencia. Así, los resultados obtenidos tras la simulación hasta el año 2050 pueden proporcionar a los responsables de la gestión del aeropuerto un conjunto de indicadores para una toma de decisiones más eficientes. Por otra parte, el planteamiento de los distintos escenarios es necesario también, ya que en función de la situación en la que se encuentre el país, se proporcionan indicadores con características y restricciones distintas.

El resto del artículo se organiza de la siguiente forma. En primer lugar, se revisa la literatura científica relacionada con el problema bajo estudio. Posteriormente, se describe el aeropuerto de Málaga y se plantean los elementos clave a interrelacionar para su posterior evaluación. En el siguiente apartado se plantea el modelo de simulación, en base al diagrama causal y de flujo, y se simula con el software Vensim®. Por último, además de realizar un análisis de los resultados e indicadores más destacados, se plantean posibles líneas de investigación futuras.

2. Revisión de la literatura

En cuanto al transporte por carretera, (Etiawan, Indarto, & Deendarlianto, 2019) basan su estudio en las preocupaciones del gobierno indonesio sobre el consumo de petróleo y,

✉ Ignacio Noguero *
nacho.noguero@gmail.com

 ORCID: 0000-0002-8550-3277

Josefa Mula *
fmula@cigip.upv.es

 ORCID: 0000-0002-8447-3387

Francisco Campuzano-Bolarin **
francisco.campuzano@upct.es

 ORCID: 0000-0003-1141-5810

* Universitat Politècnica de València, Centro de Investigación en Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), c/ Alarcón, 1, Alcoy, Alicante, Spain

** 2Business Management Department, Universidad Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar, s/n, 30202, Cartagena, Murcia, Spain

como consecuencia, las emisiones de gases de efecto invernadero que se producen en el país. Por ello, uno de los objetivos del estudio es el planteamiento de diferentes estrategias para la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO₂. Se proponen distintos escenarios, pero el que obtiene mayores beneficios es el que combina políticas medioambientales estrictas con una situación optimista de la eficiencia del combustible y su precio. Por otro lado, (Choi, Park, & Lee, 2019) proponen un modelo basado en la dinámica de sistemas que intenta pronosticar la reducción de los costes, la congestión y las emisiones de CO₂ en el sistema de transporte de Corea del Sur. Se identifica que uno de los problemas a solucionar es el transporte por carretera y sus impactos en la sociedad y se examina, positivamente, el impacto de apostar por el cambio modal al ferrocarril mediante el transporte por contenedor. Tras el análisis, se propone que se debe emprender la estandarización basada en contenedores y más ayuda con los impuestos. No obstante, en el modelo se excluyeron varios factores como datos de almacenamiento e información para el transbordo o limitaciones de la capacidad intermodal. (Wang, Zhang, Chen, & Yang, 2019) tienen como objetivo simular la gestión del servicio público de taxis en Pekín (China). Aunque se tuvo dificultades para modelar las interacciones no lineales en el sistema, se concluye resaltando que la tasa de carga vacía y la demanda total son factores clave en los que se tiene que centrar la gestión gubernamental.

En el sector del ferrocarril, (Wang & Zhang, 2017) se centran en el problema de China en cuanto a la brecha entre la demanda y la oferta de su transporte ferroviario de mercancías exprés. Pese a que es un sistema complejo con múltiples variables y bucles de retroalimentación no lineales, se concluye que, para solucionar este problema, el gobierno se debe centrar en fomentar el aumento de la tasa de transporte de mercancías y las inversiones en activos fijos ferroviarios. Debido a la complejidad del modelo, se proponen nuevas tendencias para ampliar este proyecto. Sería positivo centrarse en los tres aspectos siguientes: mejorar la precisión de los parámetros, establecer más escenarios económicos que sean realistas o probar nuevas medidas más sofisticadas para explorar una forma viable de coordinar la demanda y la oferta. Por otro lado, (Ye, Yang, Ma, & Chen, 2019) se centran en la búsqueda de factores claves para gobiernos que deben afrontar la escasez de pasajeros en las primeras etapas de funcionamiento del tranvía en una ciudad. Tras supuestos de condiciones extremas y análisis de sensibilidad, se afirma que el precio de las tarifas iniciales y el intervalo de salida entre trenes consecutivos son los factores que más impacto tienen en la demanda de pasajeros. Además, se afirma que es recomendable instalar pantallas de visualización electrónica inteligente en cada estación para informar sobre el intervalo entre los trenes de entrada y salida en tiempo real. Sin embargo, también se concluye que, si el objetivo es una intensidad media o alta de flujo de pasajeros, son necesarias estaciones periféricas donde se incluyan grandes centros

comerciales, calles peatonales, negocios, ocio o industrias de entretenimiento.

En el modo de transporte marítimo también hay publicaciones recientes basadas en la dinámica de sistemas. (Lu, 2018), en un contexto donde la competencia entre terminales internacionales de contenedores es creciente en los puertos, se esfuerzan por seguir proporcionando datos para permitir un servicio rentable y de calidad. Este artículo, tras centrar la simulación en el desarrollo de los servicios portuarios, ha concluido que la tecnología RFID (radio frequency identification) y la recopilación de datos del sistema de localización en tiempo real (RTLS) tienen un efecto positivo sobre la mejora de la productividad y el aumento de la utilización de los recursos. (Bahadir & Akdag, 2019) desarrollan un modelo basado en la dinámica de sistemas para las redes de contenedores hub & spoke. Su objetivo es comparar las políticas asociadas con algunos indicadores de rendimiento que incluyen la utilización de la capacidad, el nivel de servicio y, el rendimiento de inversión. Se puede resaltar que, en términos financieros, la decisión de un aumento de la flota ha sido más rentable que el aumento de la frecuencia de los envíos para lograr el servicio deseado, por lo que proporciona una información muy valiosa para los empresarios del sector. Como complemento al artículo, se propone que el estudio puede ampliarse para abarcar algunos procesos como la red y planificación de la distribución.

En el sector del transporte aeroportuario, (He & Wang, 2018) proponen un modelo basado en la dinámica de sistemas que se centra en la fluctuación del corredor de un aeropuerto en escenarios económicos diferentes. Se intenta definir el sistema basándose en cuatro variables de estado: la economía nacional, el tráfico de pasajeros en el aeropuerto, el flujo de pasajeros en el corredor de transporte y la capacidad de ese corredor. Se explica que cuanto menor sea el umbral de congestión, mayor será la capacidad del corredor de transporte del aeropuerto, lo que proporciona una información importante para los responsables de tomar decisiones en el flujo de pasajeros en los aeropuertos. Por otra parte, se abren nuevas tendencias de investigación en este campo, por ejemplo, tener en cuenta los diferentes tipos de corredor de transporte del aeropuerto. (Morimoto & Minato, 2011) se centran en los aeropuertos regionales japoneses que son comercialmente inestables debido a que la demanda es baja y fluctúa mucho. Tras la simulación con Vensim®, se afirma que en lugar de subvencionar a las aerolíneas regionales se deberían subvencionar los precios de los billetes para atraer más pasajeros. Si el objetivo gubernamental es la viabilidad y el incremento de servicio en este tipo de aeropuertos, estas ayudas bien gestionadas, son eficientes y eficaces para asegurar la viabilidad de los aeropuertos regionales.

Tras analizar los artículos anteriores, se ha identificado que tanto el trabajo de (He & Wang, 2018), que aportan un enfoque realista de cómo se requiere un aumento de la

capacidad del aeropuerto en base al crecimiento de flujo de pasajeros y tasas de congestión del propio aeropuerto; como el de (Suryani, Chou, & Chen, 2010), que han permitido, desde un punto social y económico, determinar qué factores pueden alterar el incremento de la tasa de flujo de pasajeros y la propia capacidad del aeropuerto, pueden servir como modelos de referencia para la investigación a desarrollar.

3. Modelo de simulación

El objetivo principal de la simulación es obtener datos los más representativos posibles sobre la futura situación del aeropuerto. Concretamente, se desea conocer la futura congestión del aeropuerto en base al flujo de pasajeros y a la capacidad del aeropuerto.

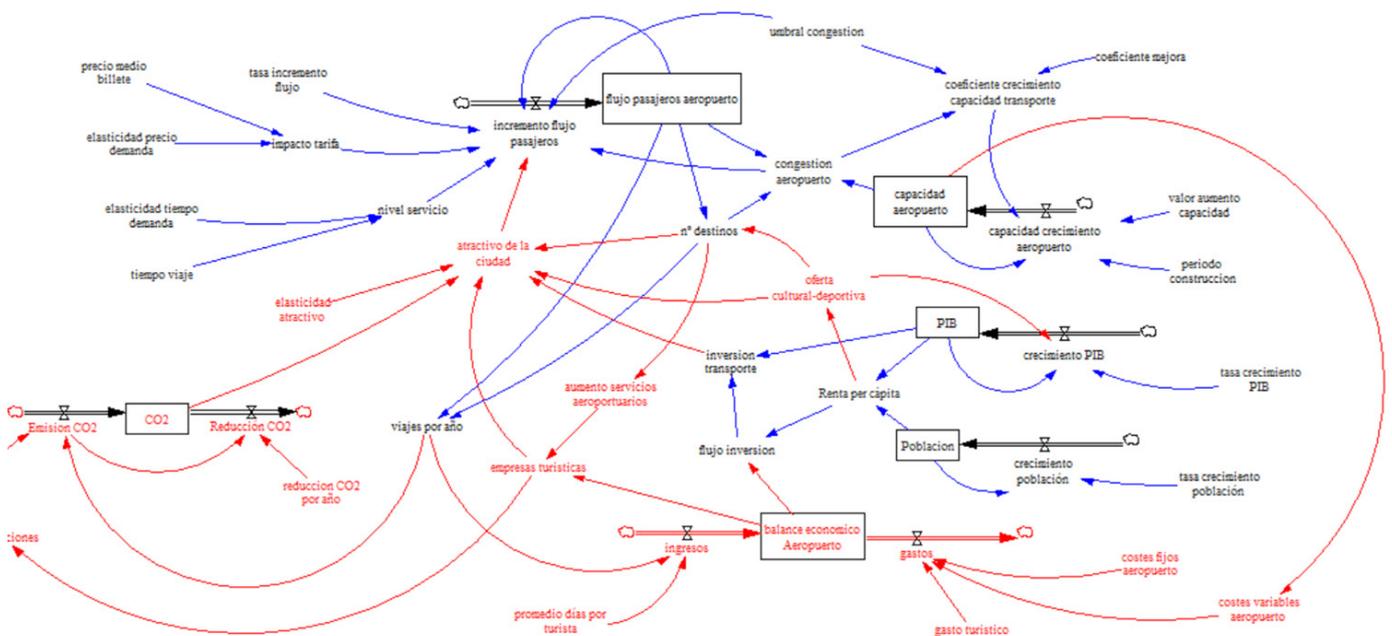
Para ello, se han planteado cuatro escenarios sociales, económicos y medioambientales con distintos umbrales y restricciones. Los cuatro escenarios planteados representan una situación estándar, otro optimista, otro pesimista y, por último, uno aplicado a la situación extrema que ha propiciado la COVID-19. De esta forma, alterando distintos elementos

del modelo, se puede llegar a conclusiones sobre los factores e indicadores a tener en cuenta por los responsables del futuro crecimiento del aeropuerto en base a la situación a la que se enfrenten.

Secundariamente, se ha intentado plasmar el impacto de factores medioambientales, económicos y sociales para simular cómo pueden llegar a evolucionar en el transcurso de los próximos años. A partir del análisis de factores como la emisión de CO₂, se puede calcular si el aeropuerto podrá ser sostenible, medioambientalmente, dentro de unos años o si, por el contrario, es un problema y debe buscar soluciones. Por otra parte, también se han considerado factores económicos y se ha simulado cómo puede evolucionar el número de empresas turísticas que puede haber dentro de unos años o el PIB (producto interior bruto) que puede generar la provincia de Málaga. De esta forma, los resultados de este estudio pueden servir a los responsables de turismo de la ciudad para focalizar sus esfuerzos o tomar medidas al respecto.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del modelo propuesto. Las variables y relaciones marcadas en rojo denotan las nuevas aportaciones de los autores con respecto a los trabajos tomados como referencia.

Figura 1 Diagrama de flujo.



La Tabla 1 describe cada una de las variables consideradas en el modelo. Las variables y relaciones marcadas en rojo

denotan las nuevas aportaciones de los autores con respecto a los trabajos tomados como referencia.

Tabla 1 Nomenclatura.

VARIABLES DE FLUJO			
Variable	Acronimo	Descripción	Unidades
Capacidad crecimiento aeropuerto	C_Cre	Representación del aumento de capacidad de un aeropuerto concreto	Miles de personas
Crecimiento de la población	Cre_p	Aumento del número de individuos en una población por unidad de tiempo	Miles de personas
Crecimiento PIB	Cre_PIB	Comparación del aumento o descenso de capacidad productividad de un lugar determinado	Miles de euros
Emisión CO2	ECO2	Emisiones contaminantes emitidas por el aeropuerto	kton de CO2
Gastos aeropuerto	Gast	Conjunto de gastos del aeropuerto	Euros
Incremento del flujo de pasajeros	Inc_F	Aumento del flujo pasajeros por año	Miles de personas
Ingresos aeropuerto	Ingr	Beneficios económicos del aeropuerto	Euros
Reducción CO2	RCO2	Reducción de emisiones de CO2	kton de CO2
VARIABLES AUXILIARES			
Variable	Acronimo	Descripción	Unidades
Aumento servicios aeroportuarios	Aum_SA	Servicios que se ofrecen en el aeropuerto	Dmln
Coefficiente crecimiento capacidad transporte	Coef_Ccap	Relación entre la congestión del aeropuerto y el umbral	%
Coefficiente mejora	Coef_Mej	Coefficiente de mejora de la capacidad. Viene predeterminada.	%
Congestión aeropuerto	CONG	Relación entre el flujo de personas y la capacidad del aeropuerto	Dmln
Costes aeropuerto	Cost_A	Suma de los costes fijos y variables anuales del aeropuerto	Euros
Costes fijos aeropuerto	CF	Costes anuales fijos que debe afrontar el aeropuerto	Euros
Costes variables aeropuerto	CV	Costes anuales variables que debe afrontar el aeropuerto	Euros
Elasticidad atractivo ciudad	E_A	Grado de respuesta(o elasticidad) de la cantidad demandada de un bien a los cambios en el atractivo de dicho bien	Dmln
Elasticidad precio demanda	E_P	Grado de respuesta(o elasticidad) de la cantidad demandada de un bien o servicio a los cambios en el precio de dicho bien o servicio.	Dmln
Elasticidad tiempo demanda	E_T	Grado de respuesta(o elasticidad) de la cantidad demandada de un bien o servicio a los cambios en el tiempo de dicho bien o servicio.	Dmln
empresas turísticas	ETUR	N.º de empresas dedicadas directa o indirectamente al turismo en Málaga	Dmln
flujo inversión	FI	Porcentaje que se destina a mejorar el transporte	Euros
Impacto Atractivo de la ciudad	I_Atrac	Impacto del atractivo de la ciudad	Dmln
Impacto nivel servicio	I_NS	Cambio en la demanda como el impacto del cambio porcentual en el promedio de tiempo de viaje	Dmln
Impacto Tarifa	I_T	Cambio en la demanda como el impacto del cambio porcentual en el precio medio del billete y los factores económicos consecuentes	Dmln
Inversión en transporte	INV_T	Recursos económicos destinados a mejorar el transporte	Euros
N.º operaciones	N_OP	N.º de operaciones aéreas que se realizan en el aeropuerto	Nº Operaciones
Nº destinos	N_DEST	Número de destinos diferentes que ofrece el aeropuerto	Dmln
Oferta cultural-deportiva	O_CD	Eventos de primer nivel tanto culturales como deportivos en la ciudad	Dmln
Periodo construcción	PC	Tiempo necesario para producirse la construcción o mejoras	Años
Precio medio billete	PRE_B	Precio medio de los billetes desde el aeropuerto basado en históricos	Euros
promedio días por turistas	D_T	N.º de días promedio que pasan los turistas en la ciudad	Días
Renta per cápita	RpC	Relación entre el PIB y la población total de un determinado lugar	Euros/persona
Tasa crecimiento PIB	T_PIB	Porcentaje de población que crece con respecto al año anterior	%
Tasa crecimiento población	T_CP	Porcentaje de PIB que crece con respecto al año anterior	%
Tasa incremento flujo	T_IF	Porcentaje de flujo de pasajeros que crecen con respecto al año anterior	%
Tasa reducción CO2	T_RCO2	Tasa de reducción de emisiones de CO2	%
Tiempo medio viaje	Tie_V	Cantidad de tiempo medio que pasa un pasajero viajando en avión	Horas
Umbral congestión	U_C	Escalón de congestión predefinido	Dmln
Valor aumento capacidad	V_A_Cap	Aumento capacidad a aumentar	Miles de personas
Valor inicial capacidad	V_CA	Valor en t=0 de la capacidad del aeropuerto	Miles de personas
Viajes por año	V_AÑO	N.º de viajes comerciales realizados por año	Nº Viajes

El umbral de congestión (1) es el índice que controla si se invierte o no en la mejora de la capacidad del aeropuerto (He & Wang, 2018). Si el grado de congestión supera el umbral de congestión, la inversión es necesaria. Para representar la congestión se ha definido que un aeropuerto con más de 155 destinos se considera intercontinental y, por lo tanto, el grado de congestión aumenta debido a la variabilidad de factores que conlleva.

$$CONG = \begin{cases} \text{if } N_DEST > 155; \left(\frac{FPA}{CAP}\right) + 0.1 \\ \text{if not}; \frac{FPA}{CAP} \end{cases} \quad (1)$$

Se asume que cuando se requiera una mejora de la capacidad, se va a incrementar siempre en la misma proporción por facilidad de simulación (2).

$$Coef_Ccap = \begin{cases} \text{if } CONG \geq U_C ; Coef_Mej \\ \text{if not}; 0 \end{cases} \quad (2)$$

La mejora que se produzca tendrá un desfase de tiempo representando la necesidad de un intervalo de tiempo para la finalización de la misma (3).

$$C_Cre = DELAY1(CAP * Coef_Ccap, PC, V_A_Cap) \quad (3)$$

El aumento de capacidad vendrá condicionado por el tipo de obra y la inversión que se realice, se asume que son obras que fluctúan alrededor de una mejora de la capacidad de un millón de personas. En este caso concreto, los límites (4) se definen como mejoras que impliquen entre un 7% y un 13% de aumento de capacidad en base al flujo anual (Suryani, Chou, & Chen, 2010).

$$Coef_Ccap = RANDOM\ UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (4)$$

El número de destinos es un factor clave en el modelado de un aeropuerto. De esta forma, en base al flujo de pasajeros anual, habrá más o menos destinos (5).

$$N_DEST = FPA + (1000 * O_CD) \quad (5)$$

Para analizar la evolución de PIB y el número total de personas que residen en Málaga, se ha utilizado la función RANDOM NORMAL (6). Para ello, se ha considerado la tasa de crecimiento histórica de estos últimos años, entendiendo que no se producirán decrecimientos o crecimientos extremos en este aspecto.

$$T_CP = RANDOM\ UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (6)$$

El crecimiento del PIB se ve condicionado, aparte de por la propia tasa de crecimiento del PIB, por la oferta cultural-deportiva de la ciudad. Esta oferta se multiplica por un factor de impacto (7).

$$Cre_PIB = T_PIB * PIB + (O_CD * 10) \quad (7)$$

En base a la renta per cápita de Málaga, se ha definido la oferta cultural-deportiva (8).

$$O_CD = \begin{cases} \text{if } RpC > 19; RANDOM\ NORMAL(0.3, 1, 0.5, 0.5, 99) \\ \text{if not}; RANDOM\ NORMAL(0, 0.8, 0.5, 0.5, 99) \end{cases} \quad (8)$$

Para calcular la inversión que se realizará, anualmente, en transporte, es necesario calcular la renta per cápita (9) y definir qué porcentaje del balance económico del aeropuerto y de la renta per cápita se destina a mejorar el transporte.

$$RpC = \frac{PIB}{POB} \quad (9)$$

Los % de inversión se refieren al porcentaje estipulado que se va a dedicar a la inversión en mejorar el transporte (10).

$$FI = (\% \text{ inversión } 1 * RpC) + (\% \text{ inversión } 2 * B-ECON) \quad (10)$$

En cuanto al número de servicios aeroportuarios y, por consiguiente, empresas turísticas dedicadas a ello, se han definido dos factores diferentes. El primero se centra en un aumento constante de empresas en base a si el aeropuerto es intercontinental o no (11). El segundo se basa en una fórmula RANDOM UNIFORM () en base al impacto que tiene el balance del aeropuerto (12). Además, se suma el grueso de empresas fijas en el aeropuerto de Málaga, en este caso 100.000 y se aumenta un factor de crecimiento en función de si el aeropuerto crece hasta llegar a ser intercontinental o no. De esta forma, se puede pronosticar la capacidad de crecimiento de las empresas turísticas en función del crecimiento del aeropuerto.

$$Aum_SA = \begin{cases} \text{if } N_DEST > 155; 100 \\ \text{if not}; 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$ETUR = RANDOM\ UNIFORM(0.000111, 0.000119, 100) * B-ECON + 100000 + Aum_SA \quad (12)$$

En cuanto a los viajes por año (13), se van a ver condicionados por el número de destinos del aeropuerto. Se ha utilizado 170 pasajeros de media si hay vuelos intercontinentales y 200 si es solo internación

$$V_AÑO = \begin{cases} \text{if } N_DEST > 155; \left(\frac{FPA}{170}\right) \\ \text{if not}; \left(\frac{FPA}{200}\right) \end{cases} \quad (13)$$

Para realizar el balance económico del aeropuerto, es necesario calcular, por un lado, los ingresos basados en el número de pasajeros que recibe el aeropuerto y, por otro lado, los costes que tiene el mismo. Los ingresos directos son los que se perciben del pasajero y los indirectos se basan en publicidad, ayudas gubernamentales, etc. El gasto medio diario dependerá del escenario.

$$Ingr = (V_AÑO * gastos\ medio\ diario * D_T) + ingresos\ indirectos \quad (14)$$

Los gastos (16) se dividen en variables como el sueldo de personal del aeropuerto (15), que se basa en la capacidad del aeropuerto, gastos fijos de mantenimiento de infraestructuras y servicios públicos, entre otros, y el gasto anual en turismo que realiza el ayuntamiento de Málaga. El sueldo medio dependerá del escenario.

$$CV = CAP * \text{porcentaje personal aeropuerto} * \text{sueldo medio por empleado} \quad (15)$$

$$Gast = CF + CV + \text{gasto turístico} \quad (16)$$

Para tener en cuenta la evolución del CO₂ emitido por el aeropuerto de Málaga (17), se han tenido en cuenta las emisiones que producen el número de aviones comerciales anuales, así como las operaciones aéreas.

$$ECO2 = (\% \text{ emisión por avión} * V_{AÑO}) + (\% \text{ emisión por operación} * N_{OP}) \quad (17)$$

Por otro lado, también se ha tenido en cuenta el porcentaje de emisiones que reducen las compañías en base a las imposiciones legales o al impacto medioambiental que tiene la mejora de los aviones (18). El porcentaje de reducción dependerá de las restricciones impuestas y de la tecnología usada y vendrá definida por una función RANDOM UNIFORM() que variará desde el 30% al 40% de las emisiones emitidas por año (19).

$$ECO2 = RANDOM UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (18)$$

$$RCO2 = \% \text{ reducción CO2 por año} * ECO2 \quad (19)$$

De esta forma, el balance global de CO₂ (20) emitido será:

$$BCO2 = INTEG (ECO2 - RCO2, Valor inicial) \quad (20)$$

Para simular la tasa de incremento del flujo de pasajeros, se ha utilizado la función RANDOM NORMAL (21). Para ello, se ha utilizado la tasa de crecimiento histórica de estos últimos años, entendiendo que no se producirán decrecimientos o crecimientos extremos en este aspecto.

$$T_{IF} = RANDOM UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (21)$$

El precio medio del billete representa el precio promedio del transporte en un avión comercial desde el aeropuerto de Málaga (22). El impacto de la tarifa aérea en la demanda (24) de los pasajeros aéreos se determina utilizando el concepto de la elasticidad del precio de la demanda (23). La elasticidad de la demanda se define como el cambio porcentual de la demanda en base al impacto del cambio del 1% en el precio medio del avión (Suryani, Chou, &

Chen, 2010). La elasticidad del precio de la demanda se ha estimado en aproximadamente 1,6 para pasajeros de turismo y 0,8 para pasajeros de negocios.

$$PRE_B = RANDOM UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (22)$$

$$E_P = RANDOM UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (23)$$

$$I_T = E_P * PRE_B \quad (24)$$

El impacto del nivel de servicio (27) contempla tanto el cambio en la demanda como el impacto del cambio porcentual en el tiempo medio de viaje por la elasticidad del tiempo. Según (Suryani, Chou, & Chen, 2010), el tiempo medio de viaje (25) asume un cambio porcentual medio en el tiempo de viaje de alrededor de un 40%. Además, se completa la ecuación con el valor absoluto de la función RANDOM NORMAL(), que proporciona una distribución normal de media 0 y varianza 1. La elasticidad del tiempo de la demanda se ha estimado en, aproximadamente, entre 1,1 y 1,8 (26).

$$Tie_V = 0.4 + ABS (RANDOM NORMAL()) \quad (25)$$

$$E_T = RANDOM UNIFORM(Lmin, Lmax, Semilla) \quad (26)$$

$$I_NS = E_T * (Tie_V) * 100 \quad (27)$$

El impacto del atractivo (28) de la ciudad se basará en cuatro factores diferentes. Para el turismo es importante que haya ciertas mejoras en forma de empresas dedicadas al sector, así como de infraestructuras. Por otra parte, también hay ciertas limitaciones medioambientales. La elasticidad del atractivo se ha estimado en, aproximadamente, 1,4.

$$I_Atrac = E_A * 0.0001 * (ETUR + INV_T + N_DEST + (10 * O_CD)) - (BCO2) \quad (28)$$

De forma general, el incremento de pasajeros viene condicionado por una mezcla de los distintos factores clave (29) aunque, principalmente, de la congestión del aeropuerto. Además, estos impactos se multiplican por el llamado factor de impacto (estándar: 2; pesimista: 1; optimista: 3; COVID-19:6), que representa la capacidad que tienen los distintos impactos en influir en el crecimiento del flujo de pasajeros. De esta forma, se pueden definir como:

$$Inc_F = \begin{cases} \text{if } CONG \leq U_C; FPA * T_{IF} + (\text{factor de impacto} * (I_{NS} + I_{Atrac} - I_T)) \\ \text{if not ; 0} \end{cases} \quad (29)$$

La Tabla 2 muestra la recopilación de datos seleccionados para la simulación de los cuatro escenarios.

Tabla 2 Datos iniciales.

Parámetro	Escenario	Valor	Unidades
Umbral congestión	1	0.8	DmIn
	2	0.85	
	3	0.75	
	4	0.85	
Coeficiente mejora	1	Entre 7 y 13	Porcentaje
	2	Entre 6 y 10	
	3	Entre 10 y 15	
	4	Entre 6 y 10	
Periodo construcción	1	1	Años
	2	3	
	3	0.75	
	4	5	
Sueldo medio empleado	1	16000	Euros/año
	2	14000	
	3	18000	
	4	13000	
Promedio días por turista	1	Entre 8 y 10	días
	2	Entre 6 y 8	
	3	Entre 10 y 12	
	4	Entre 2 y 7	
Gasto medio diario	1	99.32	euros/día
	2	85.32	
	3	105.32	
	4	65.32	
Precio medio del billete	1	Entre 130 y 170	Euros
	2	Entre 140 y 200	
	3	Entre 80 y 110	
	4	Entre 80 y 200	
Gasto turismo	1	14000000	Euros
	2	10000000	
	3	18000000	
	4	100000	

Tabla 2 Datos iniciales (cont.)

Parámetro	Escenario	Valor	Unidades
Factor de impacto	1	2	Dmln
	2	1	
	3	3	
	4	6	
Valor inicial CO2 emitido por el aeropuerto	TODOS	4300	kton de CO2
Valor inicial Flujo pasajeros	1	20000	Miles de personas
	2	20000	
	3	20000	
	4	4000	
Valor inicial capacidad aeropuerto	TODOS	25000	Miles de personas
Valor inicial PIB	TODOS	20000	Millones de euros
Tasa crecimiento PIB	1	Entre -0.0136 y 0.0383	%
	2	Entre -0.0136 y 0.0383	
	3	Entre -0.0136 y 0.0383	
	4	Entre -0.0276 y 0.0243	
Valor inicial Población	TODOS	1650	Miles de personas
Tasa crecimiento Población	1	Entre 0.011 y 0.013	%
	2	Entre 0.011 y 0.013	
	3	Entre 0.011 y 0.013	
	4	Entre 0.009 y 0.011	
Costes fijos aeropuerto	TODOS	40000	Millones de euros
Porcentaje personal aeropuerto	TODOS	0.01	Porcentaje
Valor inicial de empresas turísticas	TODOS	100000	Empresas
Valor aumento capacidad	TODOS	1	Miles de personas
Ingresos indirectos	TODOS	4.5	Millones de euros
tasa crecimiento alta	TODOS	0.02	Porcentaje
tasa crecimiento baja	TODOS	0.01	Porcentaje
% emisión por avión	TODOS	128	ton de CO2 / avión comercial
% emisión por operación	TODOS	81	ton de CO2 / avión comercial

5. Análisis de resultados

Para la validación del modelo se han realizado los siguientes test de validación (Sterman 2000): 1. Test de consistencia dimensional: Con este test se asegura que los elementos y unidades del modelo propuesto son coherentes dimensionalmente. Se ha realizado dicho test con la utilidad de Vensim para el chequeo de unidades, obteniéndose un resultado satisfactorio.

2. Test de condiciones extremas: Con este test se busca conocer la estabilidad y fiabilidad del modelo. Para ello, se ha decidido asignarle un valor inicial extremadamente pequeño (n=1000) a un elemento clave como es la capacidad del aeropuerto, otro valor inicial extremadamente grande (n=1000000) y luego, compararlo con el escenario 1. Como se aprecia en la Tabla 3 con los resultados obtenidos hasta 2030, se puede visualizar que, a mayor valor inicial de capacidad del aeropuerto, el valor de la congestión es menor y viceversa. Así, se afirma la validez de los resultados.

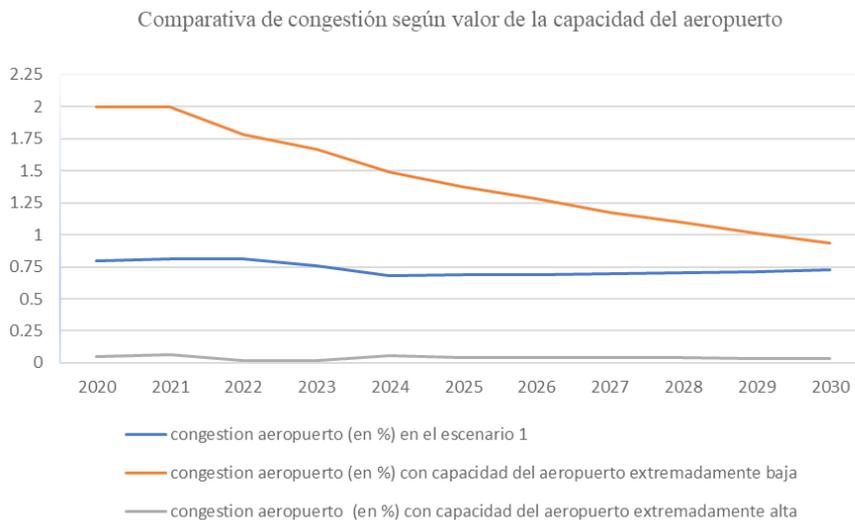
Tabla 3 Comparativa congestión del aeropuerto en función del valor inicial de la capacidad del aeropuerto

Time (año)	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
congestión (en %) con valor inicial capacidad aeropuerto 25000	0.80	0.81	0.81	0.76	0.68	0.69	0.69	0.69	0.70	0.71	0.73
congestión (en %) con valor inicial capacidad aeropuerto 1000	2.00	2.00	1.78	1.67	1.49	1.37	1.28	1.18	1.10	1.01	0.93
congestión (en %) con valor inicial capacidad aeropuerto 1000000	0.05	0.07	0.02	0.02	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Además, como se aprecia en la Figura 2, se ha realizado un gráfico comparativo de la evolución de congestión hasta el año 2030 en función de los tres valores diferentes asignados

a la capacidad del aeropuerto. De esta forma se confirma que el modelo tiende a estabilizar la congestión, como realmente pasa en la realidad.

Figura 2 Comparativa gráfica de la congestión del aeropuerto



Tras la validación de resultados, como conclusión del artículo, cabe destacar que el modelo ha permitido identificar los factores de mayor peso e impacto en el crecimiento del aeropuerto. Pese a ser una simplificación del mismo, las variables umbral de congestión, coeficiente de mejora, precio medio del billete y gasto medio diario de los turistas son las que mayor impacto tienen en el crecimiento del

flujo de pasajeros y, consecuentemente, en el incremento de ingresos para la ciudad.

La Tabla 4 muestra la recopilación de datos seleccionados tras la simulación de los escenarios estándar (1), pesimista (2) y optimista (3).

Tabla 4 Resultados obtenidos tras la simulación.

Escenario	Parámetros						Resultados		
	Umbral congestión	Coefficiente mejora	Periodo construcción	Promedio días por turista	Precio medio del billete (€)	Gasto medio diario (€/día)	Congestión media del aeropuerto	Nº de destinos máximos alcanzados	Balance económico (euros)
1	0.8	Entre 7% y 13%	1	Entre 8% y 10%	Entre 130€ y 170€	99.32	0.73	155	63,222,500 €
2	0.85	Entre 6% y 10%	3	Entre 6% y 8%	Entre 140€ y 200€	85.32	0.82	152	15,789,400 €
3	0.75	Entre 10% y 15%	0.75	Entre 10% y 12%	Entre 80€ y 110€	105.32	0.70	171	254,258,000 €

Como se puede observar en el escenario optimista, si se reduce el precio medio del billete y se consigue un aumento tanto de los días promedio que pasan los turistas en Málaga como su gasto medio, los resultados en cuanto al equilibrio de la congestión media del aeropuerto, el aumento de destinos del aeropuerto y el balance económico en 2050 crece, considerablemente, con respecto a los demás escenarios. Por ello, la toma de decisiones por parte de los responsables en cuanto a la asignación de los esfuerzos económicos y humanos es conveniente que se dirija en ese sentido.

Además, la simulación ha demostrado que, independientemente de la situación económica, política y social, hay elementos con picos de demanda o satisfacciones muy puntuales que provocan un desequilibrio en cuanto a la congestión del aeropuerto. La importancia de evitarlo es, que, al ser un aeropuerto público, tanto la planificación del mismo, así como la asignación de recursos se basan en el nivel de colapso del aeropuerto. Por ello, se puede afirmar que la determinación del umbral de congestión es trascendental, ya que marcará la realización de obras para incrementar la capacidad del aeropuerto, así como, indirectamente, determina el incremento de vuelos por año y, consecuentemente, repercute en el incremento o decremento del tejido empresarial dedicado al turismo.

Por último, si se analiza el escenario ante una situación de pandemia mundial como la producida por el COVID-19, se puede afirmar que el sector aeroportuario es uno de los más afectados. En un contexto donde se restringe el turismo por motivos sanitarios, este sector no es sostenible económicamente. Por ello, analizando el impacto sobre la ciudad de Málaga, donde este sector es una de las piezas clave se puede pronosticar un descenso de su evolución y su economía sin precedentes.

6. Conclusiones

Se puede concluir que, en el estado del arte realizado, no se ha identificado ningún artículo o documento que aborde el transporte aeroportuario con un nivel de flujo de pasajeros similar. También, se puede afirmar que no se ha encontrado ninguno que combine elementos propios del aeropuerto, sociales, políticos y medioambientales al mismo tiempo. Por otra parte, en cuanto a las novedades del modelo de simulación, se ha introducido el impacto turístico

y medioambiental del crecimiento del aeropuerto en la ciudad, que es trascendental para conocer el desarrollo y evolución de la misma a medio y largo plazo. En cuanto a las limitaciones, en este tipo de proyectos basados en modos de transporte, se puede afirmar que hay componentes que son difíciles de modelar aun siendo importantes, así como la existencia de otros elementos donde es complicado controlar su realimentación. Entre las limitaciones más importantes se pueden resaltar las medioambientales y de ruido a las que está sometido un aeropuerto, el nivel de servicio de los trabajadores del mismo, los posibles impactos tanto económicos como turísticos a los que está expuesto un país, los posibles impactos de nueva tecnología en la gestión del aeropuerto o el peso que tienen las decisiones políticas sobre el desarrollo de una infraestructura pública.

Con respecto a las ventajas del desarrollo de este proyecto, se puede destacar que ha permitido conocer los factores claves que hacen que un aeropuerto pueda crecer en función de la situación social, económica o medioambiental en la que se encuentre. Además, se ha mostrado la posible evolución turística de la provincia malagueña proporcionando información provechosa para la asignación de futuros recursos. Igualmente, al disponer de una estimación de la emisión de CO₂ que se va a producir en los próximos años en el aeropuerto, se puede actuar en consecuencia y ajustar las emisiones a las imposiciones europeas que se aproximan durante los próximos años.

Como característica crítica, cabe resaltar la necesidad de establecer parámetros como el umbral de congestión o el flujo de inversión basado en otros artículos científicos. Pese a considerar datos reales de otras situaciones similares, cada modo de transporte es diferente y ese tipo de datos son muy relativos, a la vez que trascendentales en el crecimiento del mismo. Finalmente, se propone considerar este trabajo basado en la dinámica de sistemas como la base para ampliar la línea de investigación incluyendo: (a) nuevos factores que puedan incidir en el objetivo propuesto, tales como otros medios de transporte alternativos en proceso emergente, la migración turística a otros destinos con un atractivo creciente, las decisiones políticas a nivel europeo y los avances en combustibles no fósiles, entre otros; (b) la creación de nuevos escenarios sociales, económicos y medioambientales o una combinación de los mismos; así como (c) la readaptación del escenario COVID-19 en el momento en que se tengan datos verificables y contrastables.

References

- Bahadir, & Akdag. (2019). The System Dynamics Modelling for Container Capacity & Transportation Planning Policies.
- Campuzano, F., Mula, J. (2011). Supply Chain Simulation. A System Dynamics Approach for Improving Performance. Ed. Springer.
- Campuzano, F., Mula, J., Peidro, D. (2010). Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(11), 1530-1542. doi:10.1016/j.fss.2009.12.002
- Campuzano-Bolarín, F., Mula, J., & Peidro, D. (2013). An extension to fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *International Journal of Production Research*, 51(10), 3156-3166. doi:10.1080/00207543.2012.760854
- Choi, Park, S.-i., & Lee. (2019). A System Dynamics Model of the Modal Shift from Road to Rail: Containerization and Imposition of Taxes. Roberta Di Pace.
- Etiawan, Indarto, & Deendarlianto. (2019). System Dynamics Modeling of Indonesia Road Transportation Energy Demand and Scenario Analysis to achieve National Energy Policy Target. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (págs. Volume 546, Issue 5). IOP Publishing Ltd.
- Forrester, J. (1961). *Dinámica Industrial*. Ed. El Ateneo.
- He, & Wang. (2018). Development model simulation of airport transport corridor based on system dynamics algorithm. Springer.
- He, C., & Wang, C. (2018). Development model simulation of airport transport corridor based, on system dynamics algorithm.
- Lu. (2018). Modelling and Simulation Methodology For Dynamic Resources Assignment System In Container Terminal. Dalian: Institute of E-Commerce and Modern Logistics.
- Morimoto, & Minato. (2011). Designing the commercial sustainability of unprofitable regional airports using system dynamics analysis. En *Research in Transportation Business & Management* (págs. 80-90). Guest Editors.
- Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., Díaz-Madroñero, M., & Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: Comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51(13), 4087-4104. doi:10.1080/00207543.2013.774487
- Qiu, Y. (2015). A system dynamics model for simulating the logistics demand dynamics of metropolitans: A case study of Beijing, China. University of Maryland.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World*. Massachusetts Institute of Technology.
- Suryani, E., Chou, S.-Y., & Chen, C.-H. (2010). Air passenger demand forecasting and passenger terminal capacity expansion: A system dynamics framework. *Expert Systems with Applications* (pág. 16). Elsevier.
- Wang, L., & Zhang, X. (2017). System Dynamic Model for Simulating Demand-Supply Interaction of Railway Express Freight System. *Mathematical Problems in Engineering* 2017, 10.
- Wang, Zhang, Chen, & Yang. (2019). System dynamics model of taxi management in metropolises: Economic and environmental implications for Beijing. *Journal of Environmental Management*, 555-565.
- Ye, Yang, Ma, & Chen. (2019). Modeling Influencing Factors for Passenger Flow Growth of Modern Trams Using System Dynamics Method. *Journal of Advanced Transportation*.