

Evaluación de factores influyentes en un puerto inteligente con un proceso analítico jerárquico

Gracia Buiza-Camacho¹, M^a del Mar Cerbán-Jiménez² y Cristina González-Gaya³

¹ Instituto Andaluz de Tecnología (IAT)

² Universidad de Cádiz

³ Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7800>

Los puertos siempre han sido centros estratégicos de actividad económica que vinculan el transporte marítimo y terrestre, siendo considerados motores del desarrollo económico. Podría decirse que el transporte de contenedores es la primera industria del mundo verdaderamente global [1]. Actualmente en Europa dicho transporte avanza hacia un modelo que en el 2020 será más inteligente, sostenible e integrado. Debido a ello, es prioritario disponer de información para conocer en qué situación se encuentran los puertos de

contenedores del Mediterráneo y planificar acciones para su desarrollo [2].

En esta línea hay múltiples iniciativas en la literatura, entre las que destaca [3] por su enfoque holístico e integrador. Los autores analizan el concepto *smart-port* (SP) desde tres perspectivas: operacional, ambiental y energética. Sobre un análisis bibliográfico y la consulta a expertos, determinan 23 factores que caracterizan el nivel SP de un puerto de contenedores del Mediterráneo (Tabla 1).

Por otra parte, AHP es una técnica que: a) Permite evaluar alternativas o elementos cuando deben considerarse varios criterios y determinar prioridades entre estos [4]; b) Se basa en el conocimiento y experiencia de un grupo de expertos que deben realizar comparaciones entre pares de elementos.

Existen múltiples estudios donde se aplica AHP para evaluar factores relacionados con la gestión portuaria. Así, se tienen las referencias:

- [5]: Identifica la eficiencia, la frecuencia de buques y la localización como factores principales que influyen en un operador logístico al elegir un puerto.
- [6]: Analiza ocho puertos asiáticos y establece que los criterios de evaluación más utilizados incluyen entre otros, la calidad de mano de obra, productividad interna, tiempo medio de servicio al buque en el puerto, ratio de carga y descarga, capacidad de movimiento en la terminal, coste de operación de transitarios y relación entre flujos de entrada y salida.
- [7]: Explora la importancia relativa de los factores que determinan la competitividad de un puerto de contenedores desde la perspectiva del usuario. Encuentra que el factor "coste en el puerto" es el que determina la competitividad del puerto desde la perspectiva de la naviera y la "localización del puerto" lo hace desde la de los transitarios y cargadores.
- [8]: Analiza los factores que influyen en la utilización de una determinada línea de navegación en un puerto por parte de consignatarios u operadores de contenedores. Concluye que entre estos factores están el tiempo de transbordo y unas operaciones eficientes en la terminal.

En el ámbito energético y ambiental, la literatura no muestra excesivas evidencias de la aplicación de AHP en el entorno portuario. Un ejemplo podría ser la referencia [9] que formula un modelo AHP difuso como guía para una operación portuaria *green* identificando como prioritarios la gestión de residuos peligrosos, contaminación del aire y del agua, entre otros.

En línea con las últimas investigaciones y tendencias, este trabajo pretende contribuir a orientar a los puertos de contenedores del Mediterráneo hacia criterios de *smart*. Para ello, a) Adopta el concepto SP como punto de partida, analizando la perspectiva operacional, energética y ambiental; b) Aplica AHP, con la participación de expertos europeos, para determinar la importancia relativa de cada una de estas perspectivas, así como de los fac-

Áreas	Factores
Operacional	Longitud de muelle
	Área de almacenamiento (área de patio)
	Capacidad para recibir grandes buques
	Tamaño y uso de la máxima capacidad
	Nivel tecnológico
	Nivel de automatización
	Nivel de intermodalidad
	Líneas que hacen escala en el puerto
Energía	Sistemas de gestión de la calidad, la seguridad y la salud
	Consumo total de energía (energía primaria)
	Consumo energético por parte de los contenedores
	Consumo energético de la flota interna de vehículos
	Consumo energético por parte de las oficinas
	Consumo energético por parte del sistema de iluminación
	Consumo energético por parte del equipo dedicado al movimiento de contenedores (grúas, etc.)
	Uso de energía renovable
Medio Ambiente	Sistema de gestión energética
	Sistemas de gestión ambiental
	Gestión de residuos
	Gestión del agua
	Emisiones al aire
	Contaminación acústica
Fugas y derrames de sustancias al mar	

Tabla 1: Áreas y factores del modelo SP. Fuente: Autores sobre [3]

tores que las determinan; c) Enuncia sugerencias para que autoridades portuarias y gestores de terminales de contenedores formulen estrategias que incrementen su consideración de SP y mejoren su competitividad de forma integral y equilibrada.

El concepto SP utilizado se basa en factores vinculados a información no confidencial, por lo que su medición debería ser posible utilizando fuentes públicas o recurriendo a los puertos directamente. Ello hace posible que los resultados de este trabajo puedan servir para la medición de único indicador del nivel *smart* de un puerto facilitando su comparación con otros.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El presente estudio aplica AHP, técnica que utiliza el álgebra matricial sobre comparaciones entre pares de elementos realizadas por expertos.

Entre los motivos que fundamentan la elección de este método destacan:

- Es un método sencillo, lógico y estructurado, basado en la descomposición de un objetivo o problema en una estructura jerárquica de factores o subproblemas. Facilita la labor de los expertos participantes, al permitir valorar elementos más fácilmente, comparándolos entre sí.
- Permite medir la consistencia de las opiniones de los expertos. Así, si su matriz es inconsistente, el experto debe replantearse su opinión. Si no es posible reconducir el grado de inconsistencia a valores aceptables, se elimina su opinión del estudio.
- Existen distintos software para su aplicación. Un ejemplo es *Expert Choice*, utilizado en este estudio por ser su fácil uso y por existir numerosas tutoriales y versiones gratuitas.

Los pasos dados para aplicar AHP son:

a) Elección de los expertos que emitirán sus opiniones: El estudio ha contado con la colaboración de 16 expertos de países mediterráneos (Grecia, España, Italia y Eslovenia): Seleccionados por su experiencia en proyectos europeos y estudios relacionados con la temática abordada; Participantes directa o indirectamente en el estudio del concepto SP en que se basa presente estudio y con amplio conocimiento sobre la situación de los puertos del Mediterráneo y sus expectativas futuras; Pertenecientes a autoridades

portuarias, gobiernos regionales, terminales de contenedores y otras organizaciones vinculadas al sector portuario.

b) A cada experto se le ha pasado un cuestionario que incluye las 4 matrices de valoración del estudio que deben rellenar. Todas ellas son matrices cuadradas con tantas filas como columnas y elementos a comparar:

- Matriz 1, donde los elementos a comparar son las tres áreas consideradas (operacional, ambiental y energía) en base a su influencia en el nivel de SP de un puerto.
- Matriz 2, donde los elementos a comparar son los factores que determinan la perspectiva operacional según [3] en base a su influencia en el Área Operacional de un SP.
- Matriz 3, donde los elementos a comparar son los factores que determinan la perspectiva energética según [3] en base a su influencia en el Área Energía de un SP.
- Matriz 4, donde los elementos a comparar son los factores que determinan la perspectiva ambiental según [3] en base a su influencia en el Área Ambiental de un SP.

Los elementos c_{ij} de cada matriz (en adelante, matriz de comparación) reflejan los juicios de valor de cada experto, expresados en la escala numérica de [4].

c) Una vez realizadas las evaluaciones individuales de los expertos, se ha analizado la consistencia de todas las matrices de comparación generadas (cuatro de cada experto).

Para ello se ha utilizado el soporte informático *Expert Choice*, con el que en primer lugar se ha modelizado la jerarquía objeto del estudio. El nodo más elevado de la jerarquía es la misión perseguida (por ejemplo, llegar a ser un SP) y los nodos siguientes las alternativas que se evalúan (por ejemplo, Operacional, Energía y Medio Ambiente). De igual manera, se ha diseñado la jerarquía para el Área Operacional, Energía y Medio Ambiente, teniendo en cuenta los factores identificados para cada una de ellas en [3].

Una vez realizada la modelización, se han introducido en *Expert Choice* las matrices de comparación de cada experto, obteniendo para cada una:

- El ratio de consistencia (CR). AHP mide la consistencia a través del CR y valida que los juicios emitidos por los expertos no contengan contradicciones. Generalmente un CR menor o igual que 0,11 es considerado aceptable, aunque algunos autores, como [4], recomiendan hasta 0,9. En la práctica, un umbral de 0,1 es considerado como bueno y es el que se adopta en el presente estudio. Cuando se ha excedido este límite, se ha solicitado una nueva evaluación al experto. A pesar de esta revisión, las respuestas en las matrices 2, 3 y 4 de dos expertos tuvieron que desestimarse por seguir siendo inconsistentes (superiores a 0,11).
- Un vector cuyas componentes reflejan el peso que tiene, desde la perspectiva de cada experto, cada elemento que se ha comparado.

d) Aplicando las pautas dadas por [10], se han determinado las prioridades de cada elemento considerando de forma agregada las opiniones de todos los expertos. Así, se han calculado:

- Cuatro matrices de decisión, cuyas columnas son las prioridades calculadas para cada elemento y experto.
- Cuatro matrices simétricas de coeficientes de correlación de los expertos y las matrices exponenciales correspondientes.
- Vectores c_d y w_d mediante Ec. (1) y Ec. (2):

$$c_d = [\sum_{l=1}^t \exp(r_{dl})] - \exp(r_{dd}) \quad (1)$$

$$w_d = \frac{c_d}{\sum_{l=1}^t c_l} \quad (2)$$

donde r_{dl} es el coeficiente de correlación entre experto d y el l , w_d es el peso de cada experto y t es el número de expertos.

- Pesos de cada elemento según la Ec. (3):

$$w_{jg} = [\sum_{d=1}^t (w_d w_{jd})] \quad (3)$$

donde w_{jd} es el peso del elemento j con respecto al experto d .

e) Finalmente se ha calculado la prioridad global de cada factor en el modelo planteado aplicando el principio de composición jerárquica, es decir, multiplicando la prioridad de

cada área (Operacional, Energía y Medio Ambiente) por la prioridad de cada factor que la determina.

Como herramienta de validación se aplica el método de comparaciones binarias de Thurstone [11]. Una vez los factores son comparados por pares, se calcula la proporción de veces que cada uno ha sido preferido respecto a otro, y se divide esta proporción por el número de jueces participantes. A cada una de estas proporciones se le asigna una puntuación típica Z con la que se obtiene la escala de intervalos correspondiente.

3. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra las prioridades locales de cada área estudiada:

Área	Peso local
Operacional	0,62
Energía	0,19
Medio Ambiente	0,19

Tabla 2: Pesos de cada área estudiada en un SP. Fuente: Autores

Se observa cómo los expertos consideran el Área Operacional como el más importante y que más influye en el nivel SP (62%). Las otras dos áreas (Energía y Medio Ambiente) tienen el mismo peso relativo entre sí. Los pesos obtenidos por factor en las Áreas Operacional, Energía y Medio Ambiente se muestran en la Tabla 3.

Se observa cómo el nivel tecnológico, de automatización y de intermodalidad son los que más influyen en el Área Operacional.

El consumo energético de la flota interna de vehículos y el de los equipos dedicados al movimiento de los contenedores se perciben como los factores más influyentes en el Área Energía. Son seguidos estrechamente por el consumo energético del sistema de iluminación.

En el Área Ambiental, las fugas y derrames de sustancias al mar y la implantación de sistemas de gestión ambiental normalizados son los dos factores identificados como más importantes. La gestión de los residuos y del agua son los que resultan de menor importancia.

La aplicación del método de Thurstone nos permite conocer las distancias entre cada uno de los factores, comprobándose que existen diferencias entre ellos, lo cual no se aprecia al aplicar AHP donde todos los factores se encuentran muy concentrados cada vez.

Finalmente, la Tabla 5 muestra los pesos globales de cada factor influyente en un SP como consecuencia del último paso de aplicar AHP. Se aprecia que el factor de

Áreas estudiadas en un "smart port"	Peso local
Área Operacional	
Longitud de muelle	0,10
Área de almacenamiento (área de patio)	0,10
Capacidad para recibir grandes buques	0,07
Tamaño y uso de la máxima capacidad	0,06
Nivel tecnológico	0,16
Nivel de automatización	0,15
Nivel de intermodalidad	0,15
Líneas que hacen escala en el puerto	0,11
Sistemas de gestión de la calidad, seguridad y salud	0,10
Área de Energía	
Consumo total de energía (energía primaria)	0,20
Consumo energético por parte de los contenedores	0,08
Consumo energético de la flota interna de vehículos	0,19
Consumo energético por parte de las oficinas	0,07
Consumo energético por parte del sistema de iluminación	0,12
Consumo energético por parte del equipo dedicado al movimiento de contenedores (grúas, etc.)	0,17
Uso de energía renovable	0,08
Sistema de gestión energética	0,09
Área de Medio Ambiente	
Sistemas de gestión ambiental.	0,21
Gestión de residuos.	0,12
Gestión del agua.	0,11
Emisiones al aire.	0,17
Contaminación acústica.	0,15
Fugas y derrames de sustancias al mar.	0,24

Tabla 3: Pesos de los factores que influyen en un SP en el marco de sus áreas. Fuente: Autores

mayor importancia es el nivel tecnológico, seguido por el de automatización y de intermodalidad. El menos determinante es el consumo energético de las oficinas.

4. DISCUSIÓN

La literatura presenta distintos estudios donde se destacan prioridades del sector portuario en relación al área operacional, energética o medio ambiental, así como estudios sobre qué aspectos son más importantes por parte de los operadores económicos u otras entidades a la hora de tomar una decisión sobre un puerto. El presente estudio da un paso más allá y se centra en determinar qué factores serían los más importantes para que un puerto de contenedores se acercara al concepto SP. Para ello, considera factores en el ámbito operacional, energético y ambiental y se basa en la opinión de expertos del sector.

El nivel tecnológico es el factor que más determina la configuración de un SP, seguido del nivel de automatización. Ello está en línea con diferentes estudios que se encuentran en la literatura, en la medida en que éstos establecen como factores clave de la competitividad de un puerto el "coste", la "eficiencia operativa", la

"productividad interna" o "los tiempos de operación" que podrían estar vinculados a un alto nivel tecnológico y de automatización. Adicionalmente, todo ello está alineado con las últimas tendencias internacionales en el ámbito de la sensorización y big data.

La intermodalidad se configura igualmente como uno de los factores claves. Ello viene a subrayar que los puertos ya no deben considerarse nodos aislados en las cadenas logísticas sino parte de ellas, debiendo contribuir a su optimización. Esto sin duda puede conseguirse en gran parte en base a la tecnología y la automatización, fundamentales para lograr la sincronización necesaria entre los diferentes medios de transporte (sincromodalidad).

Los factores relativos al medio ambiente y energía quedan relegados respecto a los operacionales en el marco de un SP. Ello está en línea con la percepción del sector en general sobre este tema, reflejadas en las conclusiones de la referencia [3].

Es el factor "Fugas y derrames de sustancias al mar" el más importante en este ámbito, pero siempre detrás de los factores operacionales. Las emisiones al aire se vienen considerando en general un aspecto clave en las operaciones marítimas. Sin embargo, las encontramos expli-

Factores	Peso global	Orden de importancia
Longitud de muelle	0,06	4º
Área de almacenamiento (área de patio)	0,06	4º
Capacidad para recibir grandes buques	0,05	5º
Tamaño y uso de la máxima capacidad	0,04	6º
Nivel tecnológico	0,10	1º
Nivel de automatización	0,09	2º
Nivel de intermodalidad	0,09	2º
Líneas que hacen escala en el puerto	0,07	3º
Sistemas de gestión de la calidad, la seguridad y la salud	0,06	4º
Consumo total de energía (energía primaria)	0,04	6º
Consumo energético por parte de los contenedores	0,01	9º
Consumo energético de la flota interna de vehículos	0,04	6º
Consumo energético por parte de las oficinas	0,01	9º
Consumo energético por parte del sistema de iluminación	0,02	8º
Consumo energético por parte del equipo dedicado al movimiento de contenedores (grúas, etc.)	0,03	7º
Uso de energía renovable	0,01	8º
Sistema de gestión energética	0,02	8º
Sistemas de gestión ambiental	0,04	6º
Gestión de residuos	0,03	7º
Gestión del agua	0,02	8º
Emisiones al aire	0,03	7º
Contaminación acústica	0,03	7º
Fugas y derrames de sustancias al mar	0,05	5º

Tabla 5: Pesos globales de los factores que influyen en un SP. Fuente: Autores

citamente en un séptimo lugar en cuanto a su relevancia en el concepto SP. En todo caso, indudablemente es un aspecto implícito en la implantación de un sistema de gestión ambiental normalizado (factor con sexto puesto en Tabla 4). A pesar de la existencia de estudios que determinan el consumo energético de los contenedores refrigerados como relevantes, a nivel de SP este factor no ha sido especialmente destacado por los expertos. En cualquier caso, es fundamental que el presente estudio se realice periódicamente, no sólo por la evolución que pueda experimentar el concepto de SP en sí mismo, sino por las variaciones que pueden producirse en la importancia percibida por los expertos sobre los factores que lo determinan.

Mediante la validación se ha comprobado que los factores no están tan próximos como parece deducirse al aplicar AHP, sino que en realidad existen distintos conjuntos que los expertos participantes discriminan. Adicionalmente, ha permitido comprobar la validez de contenidos en base a la proximidad de los factores en la escala.

Las conclusiones generales de este estudio están alienadas con las alcanzadas en otras iniciativas como [12] donde el Área Operacional era mejor valorado frente a las de Energía y Medio Ambiente, y obtenía mayor relevancia el nivel tecnológico y los factores relacionados con la

gestión de infraestructuras.

El resultado del presente estudio es de alto interés para aquellos puertos que aspiran a ser SP, ya que proporciona información relevante para establecer el plan estratégico que les permita alcanzar este objetivo.

Como limitación principal del estudio cabe destacar que se centra en la actividad portuaria relacionada con la mercancía transportada en contenedores en el Mediterráneo. Por otra parte, AHP permite llegar a una priorización en base a un análisis minucioso del problema y al conocimiento, experiencia y opinión de expertos, con la limitación que ello supone. El uso de un análisis de regresión o de ecuaciones estructurales podría contribuir a conocer mejor las relaciones causales entre los factores del concepto SP.

Como otras líneas de trabajo futuras se propone ampliar el estudio para contemplar la actividad global de los puertos, y no sólo en relación a su actividad asociada al tráfico de contenedores. Adicionalmente, se debería reflexionar sobre la inclusión de otras áreas que intuimos como muy influyentes en el concepto SP, como el socio-económico, y utilizando los pesos obtenidos para cada factor, llegar a definir una función matemática que facilite el cálculo del índice SP para cada puerto.

PARA SABER MÁS

- [1] UNCTAD. (2014). "Review of Maritime Transport 2014". United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). United Nations Publication. Consultado en: unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2014_en.pdf en octubre 2015.
- [2] MED Programme. 2013. "Terms of reference. Call for proposals on Integrated Maritime approach". Consultado en: <http://www.programmed.eu/en.html> en octubre 2015.
- [3] Buiza-Camacho G, Cerbán-Jiménez M, Cepolina S, Djordjevic O, Dobrijevic A, González-Gaya C. (2015). "Current situation of the Mediterranean container ports regarding the operational, energy and environment areas". 6th IESM Conference, October 2015, Seville, Spain.
- [4] Saaty TL. (1980). "The Analytic Hierarchy Process", New York: MacGraw-Hill.
- [5] Tongzon JL. (2009). "Port choice and freight forwarders". *Transportation Research Part E*, Vol. 45, p. 186-195. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2008.02.004>
- [6] Teng JY, Huang WC, Huang MJ. (2004). "Multicriteria evaluation for port competitiveness of eight East Asian container ports". *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 12 (4), p. 256-264. Consultado en <http://jms.ntou.edu.tw> en Agosto 2015.
- [7] Yuen CI A, Zhang A, Cheung W. (2012). "Port competitiveness from the users' perspective: An analysis of major container ports in China and its neighboring countries". *Research in Transportation Economics*, Vol. 35, p. 34-40. DOI: [10.1016/j.retrec.2011.11.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2011.11.005)
- [8] Yang CC, Tai HH, Chiu WH. (2014). "Factors influencing container carriers' use of coastal shipping". *Maritime Policy & Management*, Vol. 41 (2), p. 131-133. DOI: [10.1080/03088839.2013.819134](http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2013.819134)
- [9] Chiu RH, Lin LH, Ting SC. (2014). "Evaluation of Green Port Factors and Performance: A Fuzzy AHP Analysis". *Hindawi Publishing Corporation. Mathematical problems in Engineering*. Vol. 2014. Article 802976. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/802976>
- [10] Aldian A, Taylor MA. (2005). "A consistent method to determine flexible criteria weights for multicriteria transport project evaluation in developing countries". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, p. 3948-3963. DOI: <http://doi.org/10.11175/easts.6.3948>
- [11] Barbero, M. I. (2007). Métodos de elaboración de escalas [Scaling methods]. Madrid, España: UNED.
- [12] SMART PORT Project. Consultado en: <http://www.medmaritimeprojects.eu/section/smart-port-redirect/outputs> en octubre de 2015.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic7800-1.pdf

