Análisis de la red marítima del puerto de Barcelona
Analysis of the Maritime Network of the Port of Barcelona

Íñigo López Ansorena[1*]

Resumen

El puerto de Barcelona es un gran nodo marítimo del Mediterráneo occidental que mueve cada año cerca de 70 millones de toneladas y más de 3 millones de contenedores. Sin embargo, poco se conoce sobre las características de su red marítima. El presente artículo pretende arrojar luz sobre ella mediante un análisis de dos etapas. En primer lugar, se utiliza un enfoque de agrupación para revelar grupos de puertos bien conectados con Barcelona. A continuación, se utilizan dos métricas de centralidad (grado e intermediación) con el objeto de identificar los puertos que ocupan una posición especial en la red. Los resultados muestran que la red tiene una estructura jerárquica en la que se distinguen tres grupos de puertos bien conectados. En el artículo se discuten esos grupos y los puertos dominantes en cada área geográfica. Los hallazgos son importantes no sólo desde la perspectiva de las navieras interesadas en el diseño de servicios regulares a/desde Barcelona, sino también desde la perspectiva del propio puerto. La Autoridad Portuaria puede utilizar los resultados de la investigación para reforzar la cooperación con los puertos más relevantes de su red a través de acuerdos de hermanamiento.

Palabras clave: conectividad marítima, teoría de grafos, métricas de centralidad, centralidad de grado, centralidad de intermediación, Barcelona, servicios regulares.

Abstract

The port of Barcelona is a major maritime hub in the Western Mediterranean, handling around 70 million tonnes and more than 3 million containers every year. However, little is known about the characteristics of its maritime network. This article aims to shed light on it through a two-stage analysis. First, a clustering approach is taken to reveal groups of ports well connected to Barcelona. Then, two centrality metrics (degree and betweenness) are used to identify the ports that occupy a special position in the network. The results show that the network has a hierarchical structure in which three groups of well-connected ports can be distinguished. The article discusses these clusters and the dominant ports in each geographical area. The findings are important not only from the perspective of shipping lines interested in designing scheduled services to/from Barcelona, but also from the perspective of the port itself. The Port Authority can use the results of the research to strengthen cooperation with the most relevant ports in its network through twinning arrangements.

Keywords: *Maritime connectivity, graph theory, centrality metrics, degree centrality, betweenness centrality, Barcelona, regular services.*

1. INTRODUCCIÓN

El transporte marítimo es un pilar fundamental sobre el que se apoya el comercio internacional. Según UNCTAD (2019) el volumen total de las mercancías transportadas por vía marítima en todo el mundo alcanzó en el año pre-pandémico de 2018 los 11.000 millones de toneladas. Teniendo presente su importancia, Kringelum (2019) identificó los cuatro desafíos fundamentales a los que se enfrentan hoy en día los puertos: 1) la diversificación de los clientes; 2) los requisitos para la creación de nuevo valor; 3) las limitaciones de la captura de valor en un mundo cambiante; y 4), las asociaciones estratégicas, los *clusters* y los efectos de red. Este último reto no es solo de vital importancia para las autoridades portuarias, también lo es para las compañías navieras que transbordan los contenedores en servicios regulares. Cuanto mayor es el número de servicios regulares y mayor es el número de escalas en un puerto, mejor es la integración de ese puerto en las redes marítimas globales.

En los últimos años muchas investigaciones han utilizado conceptos de la teoría de grafos para analizar y extraer información de las redes marítimas. Sin embargo, hasta donde sabemos, pocas se han ocupado de la red marítima de los puertos del mediterráneo occidental y nuestro objetivo es precisamente llenar este vacío con el análisis de la red del puerto de Barcelona. Según la Autoridad Portuaria de Barcelona (2020), el puerto movió en 2019 más de 67 millones de toneladas siendo China su socio comercial más destacado, si bien los intercambios con Egipto, Turquía y Arabia Saudí también registraron un gran dinamismo.

El presente artículo pretende arrojar luz sobre su red marítima con el objetivo principal de detectar grupos de puertos bien conectados, lo cual revelará los principales corredores marítimos hacia/desde Barcelona. El segundo objetivo es analizar los puertos a través de métricas de centralidad, lo cual permitirá identificar los puertos más dominantes en la red desde diferentes perspectivas. Por lo tanto, debemos responder a dos preguntas de investigación en el campo del análisis clásico de redes:

P-1: ¿Qué puertos están bien conectados?
P-2: ¿Qué puertos son centrales en la red?

[1] Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos.

[*] Email: inigo.lopezansorena@unir.net

Las dos cuestiones, que se pueden incluir en el cuarto de los desafíos de Kringelum (2019), pues son cruciales para el puerto y pueden afectar a sus futuras estrategias. En otras palabras, la Autoridad Portuaria de Barcelona podría reforzar la cooperación e impulsar acuerdos de colaboración, o hermanamiento, con los puertos más centrales de su red.

Organizamos el resto del artículo de la siguiente manera. La siguiente sección, fuentes, aborda el papel de la teoría de grafos en el contexto de las redes marítimas, incidiendo en los métodos de agrupación y las métricas centralidad, para seguidamente sentar las bases de la investigación con unas breves reflexiones. Luego la siguiente sección describe la metodología que se descompone en dos partes: en la primera se explica el método de agrupación de Louvain, y en la segunda se explican las métricas de centralidad utilizadas en la investigación. A continuación, se presentan los principales resultados, así como su discusión, y finalmente, la última sección trae las conclusiones y sugiere las futuras investigaciones derivadas del presente estudio.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La teoría de grafos en el contexto de las redes marítimas

La teoría de grafos es una rama de las matemáticas que se ocupa de cómo se pueden construir (codificar) las redes y medir sus propiedades, véanse Newman (2010) o Rodrigue (2017). Aunque la incorporación de la teoría de grafos al estudio de redes marítimas es relativamente reciente, ha ganado gran popularidad en los últimos años. Normalmente las redes marítimas se abstraen en grafos donde los nodos son puertos y los enlaces son rutas marítimas. Según sea el tipo de enlace podemos definir los grafos en función de su dirección (grafos dirigidos o no dirigidos) y en función del peso de las conexiones (grafos ponderados o no ponderados), véanse los dos primeros ejemplos en la figura 1 (A y B). Por otro lado, según la forma en que se elabora el grafo que representa la red marítima existen dos posibilidades, el Grafo con Enlaces Directos (GED) y el Grafo con Todos los Enlaces (GTE). En el primero (GED) solo se conectan los puertos consecutivos dentro de la ruta o servicio de línea, es decir, dos puertos están conectados por un servicio de línea solo si en ellos se escala de forma consecutiva. Por su parte, el GTE incluye no solo las conexiones directas, consecutivas o adyacentes, sino también las indirectas proporcionadas por los servicios de línea, véase la figura 1 (C y D).

Todos estos aspectos se reflejan en el contexto de las redes marítimas. Algunos estudios utilizan grafos ponderados (generalmente el factor de peso se expresa en TEUs, movimientos o número de servicios) y tienen en cuenta la dirección de las conexiones, por ejemplo, Wang y Cullinane (2016) o Park *et al.,* (2017), mientras que otros estudios no dan relevancia a la dirección de las conexiones, por ejemplo, Ansorena y Valdecantos (2021). En cuanto a la configuración GED o GTE, tampoco hay una unanimidad sobre cuál de las dos representan mejor el contexto marítimo. Algunas investigaciones utilizan el enfoque GTE, por ejemplo, Ansorena (2020), mientras que otros utilizan tanto el GED como el GTE, por ejemplo, Ducruet y Noteboom (2012).

Con respecto a las fuentes de información que estudios anteriores han utilizado para elaborar el grafo, podemos destacar Containerization International (CI) y Alphaliner (AL), véase, por ejemplo, Wang y Cullinane (2011), y otros se apoyan en Lloyd's List Intelligence (LLI), véase, por ejemplo, González Laxe *et al.* (2015) o Wang *et al.* (2017). El principal inconveniente de todas estas fuentes es que no son libres. Una fuente alternativa de acceso libre son las memorias anuales de la Autoridades Portuarias que, en el caso de los puertos españoles, suelen facilitar toda la información relativa a los servicios regulares de línea desde el puerto en cuestión.

2.2. Métodos de agrupación y métricas centralidad en las redes marítimas

La competencia ha llevado a las compañías navieras a fortalecer su cooperación para encontrar nuevas oportunidades en un mercado globalizado, véase Caschili *et al.* (2014). En las redes marítimas los puertos se agrupan y forman grupos relativamente densos y bien conectados, denominados comunidades en la teoría de grafos. En general, las comunidades no se conocen de antemano, sin embargo, el enfoque de *clustering* puede ayudarnos a detectar las comunidades existentes en nuestra red. Esto también debería revelar la mejor estrategia para operar en el mercado del Mediterráneo occidental a través de Barcelona.

Para detectar comunidades en la red se pueden utilizar diversos procedimientos, y uno de los más conocidos es la optimización de la modularidad. La idea básica es que una función objetivo (modularidad) debe ser optimizada para encontrar nodos con conexiones densas y fuertes

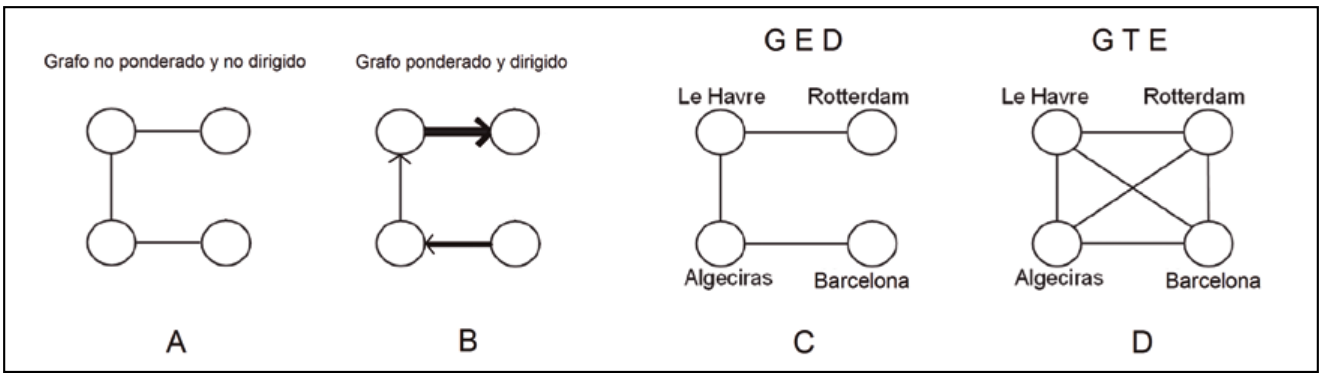


Figura 1. Elaboración de la red marítima. Tipos de configuración.

entre ellos, y al mismo tiempo con conexiones más escasas y débiles con otros nodos. Entre los algoritmos más populares y citados en la literatura de detección comunitaria por optimización de la modularidad se encuentra el denominado *algoritmo de Louvain,* propuesto originalmente en Blondel *et al.* (2008). Un análisis comparativo desarrollado en Lancichinetti y Fortunato (2009) reveló que este algoritmo era uno de los más rápidos y de mejor rendimiento entre los existentes. Con respecto a las redes marítimas, ya se ha utilizado la optimización de la modularidad. Véase así, por ejemplo, la minimización de la modularidad en Kaluza *et al.* (2010), el método de búsqueda heurística de Girvan-Newman, en Bartholdi *et al.* (2016), o más recientemente, la aplicación del método de Louvain para analizar la red marítima mundial en Ansorena (2018) y la del puerto de Algeciras en Ansorena (2020).

La segunda etapa del estudio debe seleccionar una métrica (o varias métricas) para responder a la pregunta "¿Qué nodos son importantes?". La respuesta se da en términos de cómo se debe cuantificar la importancia de cada nodo, o en otras palabras, cómo deben clasificarse los nodos. Los estudios anteriores ya han utilizado métricas de centralidad, por ejemplo, la Centralidad de Grado, la Centralidad de Intermediación, la Centralidad de Cercanía o la Centralidad de Eigen, cada una tiene sus propias características y objetivos. Por lo general, una métrica de centralidad que es relevante en un contexto no es apropiada en un contexto diferente, véase como ejemplo el análisis de centralidades de la red del puerto de Valencia en Ansorena y Valdecantos (2021).

En general, dos son las medidas que aparecen en la mayoría de los estudios marítimos: centralidad de grado y centralidad de intermediación. Por un lado, la centralidad de grado cuenta para cada puerto el número de enlaces directos con otros puertos, es decir, es una medida de conectividad local. Por otro lado, la centralidad de intermediación es vista como una medida más global que suma para cada puerto el número de sus posiciones en las rutas más cortas posibles dentro de toda la red, es decir, es una medida de accesibilidad a través de escalas intermedias.

2.3. Reflexiones sobre la literatura revisada

En esta sección hemos revisado algunos de los estudios más notables o relevantes para el nuestro. Podemos concluir que las redes marítimas tienen una base matemática obvia, que tiende a ser definida por los puertos (nodos) y las rutas marítimas (enlaces) y que en este contexto la teoría de grafos es una herramienta muy poderosa para su análisis. Hay que destacar que la teoría de grafos ya ha sido utilizada anteriormente en el análisis de áreas marítimas específicas, por ejemplo, el Atlántico Sur, el noreste de Asia, el Canal de Suez y el Canal de Panamá, e incluso los puertos españoles del mediterráneo (González Laxe *et al.,* 2015), si bien éste último estudio no abordó la red marítima del puerto de Barcelona desde la perspectiva que se propone en esta investigación y esto sí es una novedad.

En suma, proponemos un enfoque de dos etapas que combina la optimización de modularidad y el análisis de centralidad. Este doble marco debería arrojar nueva luz sobre la red marítima del puerto de Barcelona. Las principales diferencias con los estudios anteriores son:

1. esta investigación se centrará en un único puerto, es decir, analizaremos la red marítima desde la perspectiva de Barcelona;
2. obtenemos los datos de la *Memoria Estadística* del 2017 (Autoridad Portuaria de Barcelona 2018) que es una fuente gratuita y de libre acceso;
3. elegimos la configuración GTE en lugar de la GED; y
4. el peso de las conexiones será el número de servicios de línea en lugar del número de TEU o los movimientos de buques utilizados en otros estudios.

Estimamos que estas cuatro características permitirán una mejor representación de la red marítima del puerto de Barcelona.

3. METODOLOGÍA

3.1. Detección de comunidades

Tomamos prestada la técnica de detección comunitaria propuesta originalmente por Blondel *et al.* (2008), también conocida como el *método de Louvain.* En este método la estructura de comunidades se obtiene a través de la optimización de una función objetivo denominada modularidad, que se define como:

$$Q = \frac{1}{2m}\sum_{ij}\left[A_{ij} - \frac{k_i \times k_j}{2m}\right]\delta(c_i, c_j) = \frac{1}{2m}\sum_{c}\left[e_c - \frac{K_c^2}{2m}\right]\delta \qquad [1]$$

El algoritmo trata de maximizar la diferencia entre el número real (actual) de conexiones en una comunidad (e_c) y el número esperado de conexiones en esa misma comunidad, que se expresa como el segundo sumando dentro del sumatorio.

Donde:

Q es la función de Modularidad

A_{ij} representa el peso de la arista entre los nodos i y j

k_i y k_j son la suma de los pesos de las aristas de los nodos i y j

K_c es la suma de los grados de todos los nodos en la comunidad *c*.

m es la suma de todas las conexiones existentes en la red.

δ toma el valor 1 cuando los nodos i y j caen en la misma comunidad y el 0 en caso contrario.

Como se explica en Blondel *et al.* (2008), el algoritmo se establece en dos pasos o niveles que se repiten de forma iterativa. En primer lugar, se buscan grupos "pequeños" optimizando la modularidad de forma local. En el punto de partida, el algoritmo asigna una comunidad diferente a cada nodo de la red. Así, en esta partición inicial hay tantas comunidades como nodos. Luego, para cada nodo 'i', el algoritmo toma los vecinos 'j' de 'i' y evalúa la ganancia de modularidad que tendría lugar eliminando 'i' de su comunidad y colocándolo en la comunidad de 'j'. El nodo 'i' se coloca en otra comunidad para la que esta ganancia sea máxima, pero sólo si es positiva. Si no es posible ninguna ganancia positiva, 'i' permanece en su grupo original. Este proceso se aplica repetida y secuencialmente a todos los nodos hasta que no se puede lograr ninguna mejora adicional y se completa la primera etapa. En otras palabras,

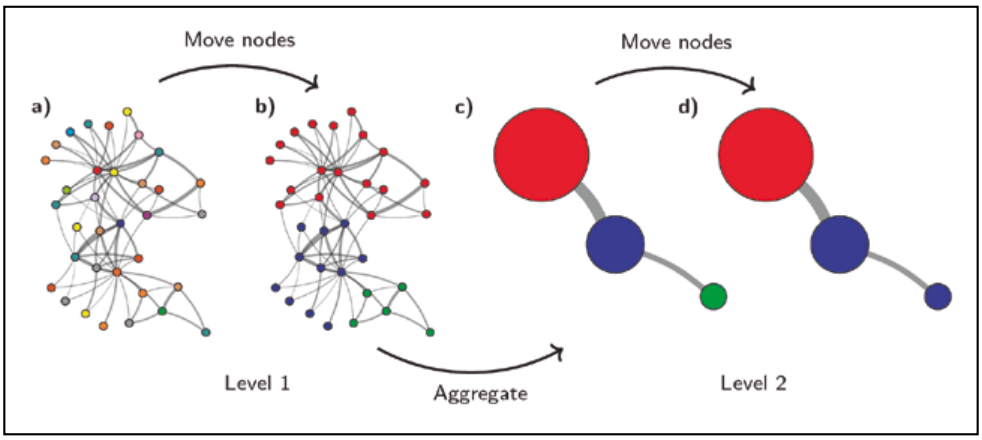


Figura 2. Cómo funciona el *algoritmo de Louvain.*

esta etapa se termina cuando se alcanza un máximo local de la modularidad, es decir, cuando ningún movimiento individual puede mejorar la modularidad.

El siguiente paso consiste en construir una nueva asociación cuyos nodos son las comunidades previamente establecidas. Para ello, los pesos de los enlaces entre los nuevos nodos vienen dados por la suma del peso de los enlaces entre los nodos de las dos comunidades correspondientes. Los enlaces entre nodos de una misma comunidad conducen a bucles propios para esta comunidad en la nueva red. Una vez completado este segundo nivel, es posible volver a aplicar la primera etapa del algoritmo a la red ponderada resultante e iterar. Estos dos pasos se repiten de forma iterativa hasta que se alcanza un máximo de modularidad.

En suma, tal y como se muestra en la figura 2, adaptada de Traag *et al.* (2019), el método parte de una partición individual en la que cada nodo está en su propia comunidad, figura 2-a. El algoritmo mueve nodos individuales de una comunidad a otra para encontrar una partición, vea la figura 2-b. Basada en esta partición, se crea una red agregada, véase la figura 2-c. El algoritmo entonces mueve nodos individuales en la red agregada, véase la figura 2-d. Estos pasos se repiten hasta que la calidad (modularidad o función objetivo) no se puede aumentar más. Como resultado se obtienen grupos de nodos (puertos) bien conectados.

3.2. Determinación de la centralidad

La segunda fase de la metodología es independiente de la anterior, suponemos un grafo dado G:= (n, e) con nodos 'n' y 'e' enlaces, y pasamos a estudiar la centralidad de los nodos de la red.

En primer lugar, definimos grado de un nodo como el número de sus conexiones (entrantes o salientes), siendo la Centralidad de Grado (CG) del nodo 'i' la medida más simple de su centralidad. Se calcula como el número de conexiones que inciden en el nodo mediante:

$$CG(i) = \sum_{j=1} a_{ij} \qquad [2]$$

Donde aij = 1 si hay un enlace entre los nodos 'i' y 'j', $a_{ij} = 0$ en caso contrario.

Alternativamente, podemos considerar que las conexiones están ponderadas por un factor de peso. En este caso, la centralidad del grado ponderado (CGP) del nodo 'i' es:

$$CGP(i) = \sum_{j=1} w_{ij} \times a_{ij} \qquad [3]$$

Donde w_{ij} es el factor de peso del enlace que conecta el nodo 'i' a 'j' (en nuestro caso de estudio es el número de servicios de línea entre dos puertos de la red). Como se mencionó antes $a_{ij} = 1$ si hay conexión entre 'i' y 'j', $a_{ij} = 0$ en caso contrario.

Por tanto, se puede utilizar la CG para revelar la conectividad local de los puertos (estrictamente como número de enlaces a otros puertos), o la CGP tomando no solo las conexiones con otros puertos, sino el número de servicios de líneas (la conexión entre dos puertos puede tener más de un servicio de línea). Pero en algunos casos, un mayor número de conexiones (CG), o incluso un mayor número de conexiones ponderadas (CGP), puede no dar una mayor influencia en la red. Esta es la razón detrás de la inclusión de la centralidad de intermediación (CI) en nuestro análisis. Este concepto suele estar vinculado a las políticas de transbordo y está establecido como un buen indicador de la accesibilidad marítima. La CI permite detectar los puertos de transbordo que ocupan posiciones intermedias clave en la red.

La CI del nodo 'i' es el número de veces que el nodo 'i' actúa como puente a lo largo de la ruta más corta entre otros dos nodos y se calcula desde la perspectiva de una red no ponderada, no dirigida y con relaciones estrictamente binarias entre nodos, véase Freeman (1977). Por tanto, la idea básica es medir todas las rutas más cortas entre pares de puertos y luego contar cuántas veces un puerto está en la ruta más corta entre dos puertos más. La CI del nodo 'i' se calcula mediante la expresión:

$$CI(i) = \sum_{j,k} g_{jk}(i)/g_{jk} \qquad [4]$$

Donde 'g_{jk}' es el número de rutas más cortas que conectan los nodos 'j' y 'k', y '$g_{jk}(i)$' el número de rutas más cortas entre 'j' y 'k' en las que está el nodo 'i'.

A continuación, exponemos un ejemplo para clarificar los conceptos de CG y CI, véase la figura 3. En la red marítima de la figura se observa que tanto el nodo B como el C tienen el mismo número de conexiones a otros puertos (misma centralidad de grado). Sin embargo, el nodo B tiene una mejor posición dentro de red, al ser un punto de paso en 26 caminos mínimos (4 veces entre nodos A y C, 16 veces entre nodos A y D, y 6 veces entre nodos A), mientras que el nodo C solo actúa de puente en 20 caminos mínimos (16 veces entre nodos A y D, 4 veces entre nodos B y D). Por tanto, B desempeña un papel de "intermediación" que le da más relevancia en la red.

La tabla 1 resume para cada uno de los nodos de la red anterior su CG (que como se ha indicado es una medida de la conectividad local del nodo) y el valor de $\Sigma g_{jk}(i)$ para el cálculo de la CI (que como se ha indicado es la facultad de un nodo de dar accesibilidad global a la red). Este es un caso sencillo que puede ser resuelto sin mucha dificultad. Sin embargo, para casos más complejos, con mayor número de nodos y enlaces, es conveniente especialmente en el cálculo de la CI la aplicación de algún algoritmo de resolución, por ejemplo, el de Brandes (2001).

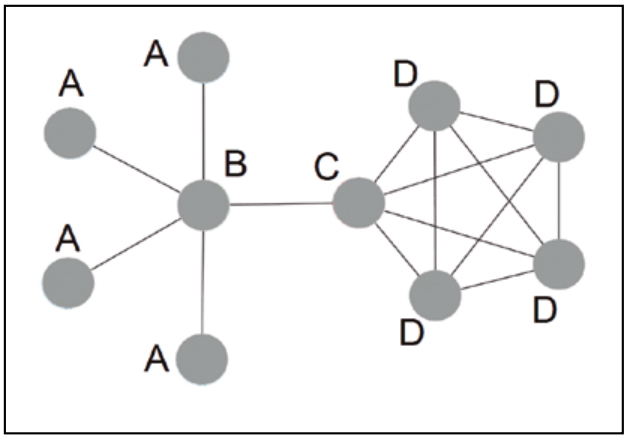
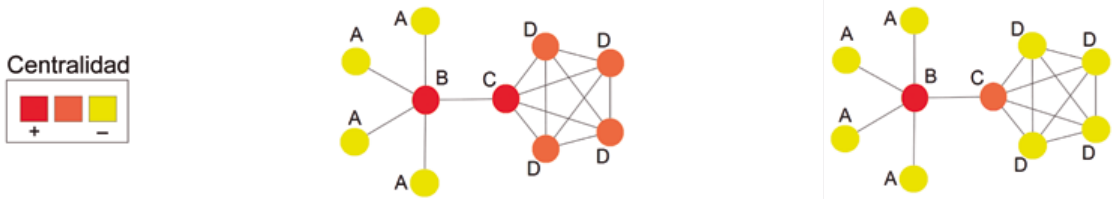


Figura 3. Ejemplo de centralidades de grado e intermediación.

Tabla 1. Métricas de centralidad

Nodos	Grado	Intermediación $\Sigma g_{jk}(i)$
A	1	0
B	5	**26**
C	5	20
D	4	0



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La red marítima del puerto de Barcelona sobre la que trabajamos es el GTE que incluye 212 puertos y 3.139 conexiones. La aplicación del *método de Louvain* a la red revela 3 grupos de puertos bien conectados, véase la figura 4. En este primer grafo el color de los nodos indica el grupo al que pertenecen y el tamaño de los mismos da una idea del número de conexiones del puerto (proporcional al grado del nodo). Se observa un grupo dominante que incluye al puerto de Barcelona (Grupo 1) y que, además, es el más numeroso (112 puertos). El segundo grupo con un total de 56 puertos incluye algunos puertos importantes del Mediterráneo occidental (Algeciras y TangerMed), central (Livorno) y oriental (El Pireo). Finalmente, el Grupo 3 es el menos numeroso con 44 puertos.

A continuación, la figura 5 muestra una transformación del grafo anterior. En ella el tamaño de los nodos es equivalente al número de puertos en el respectivo grupo y el grosor de las conexiones es proporcional al número de enlaces existentes, bien entre grupos o bien entre puertos del mismo grupo (bucles). La transformación confirma la correcta aplicación del método de agrupamiento. También se confirma que el grupo 1 no solo es el más importante en términos de número de puertos (112), sino también lo es en número de enlaces tanto internos, dentro del grupo, como externos hacia otros grupos de la red. En otras palabras, el grupo 1 proporciona una buena accesibilidad a los otros grupos de la red (nótese que grupo 2 y el 3 están peor conectados entre sí). Es interesante también observar como el grupo 3, el de menor número de puertos de la red, tiene una estructura más densa que el grupo 2. Es decir, los 44 puertos del grupo 3 están mejor integrados dentro de su propio grupo que los puertos del grupo 2 (508 conexiones internas frente a 446). ¿Cuál es el motivo de que un grupo más pequeño presente una estructura más densa de enlaces? Si bien la figura 5 da una visión más profunda de la red marítima, todavía no es suficiente para responder a determinadas cuestiones como esta.

En estas primeras representaciones, aunque claramente se percibe que los puertos forman entidades más o menos homogéneas dentro de la red, no podemos descubrir las ubicaciones predominantes, por ejemplo, puertos muy distantes como Jeddah (en Oriente Medio) y Antwerp (Europa) forman parte del mismo grupo. Para lograr una mejor comprensión de la red resulta imprescindible la geo-localización de los nodos. Esto último permite descubrir algunas características que todavía permanecen escondidas.

En la figura 6 es fácil comprobar que en determinadas zonas hay una cierta correlación entre la ubicación

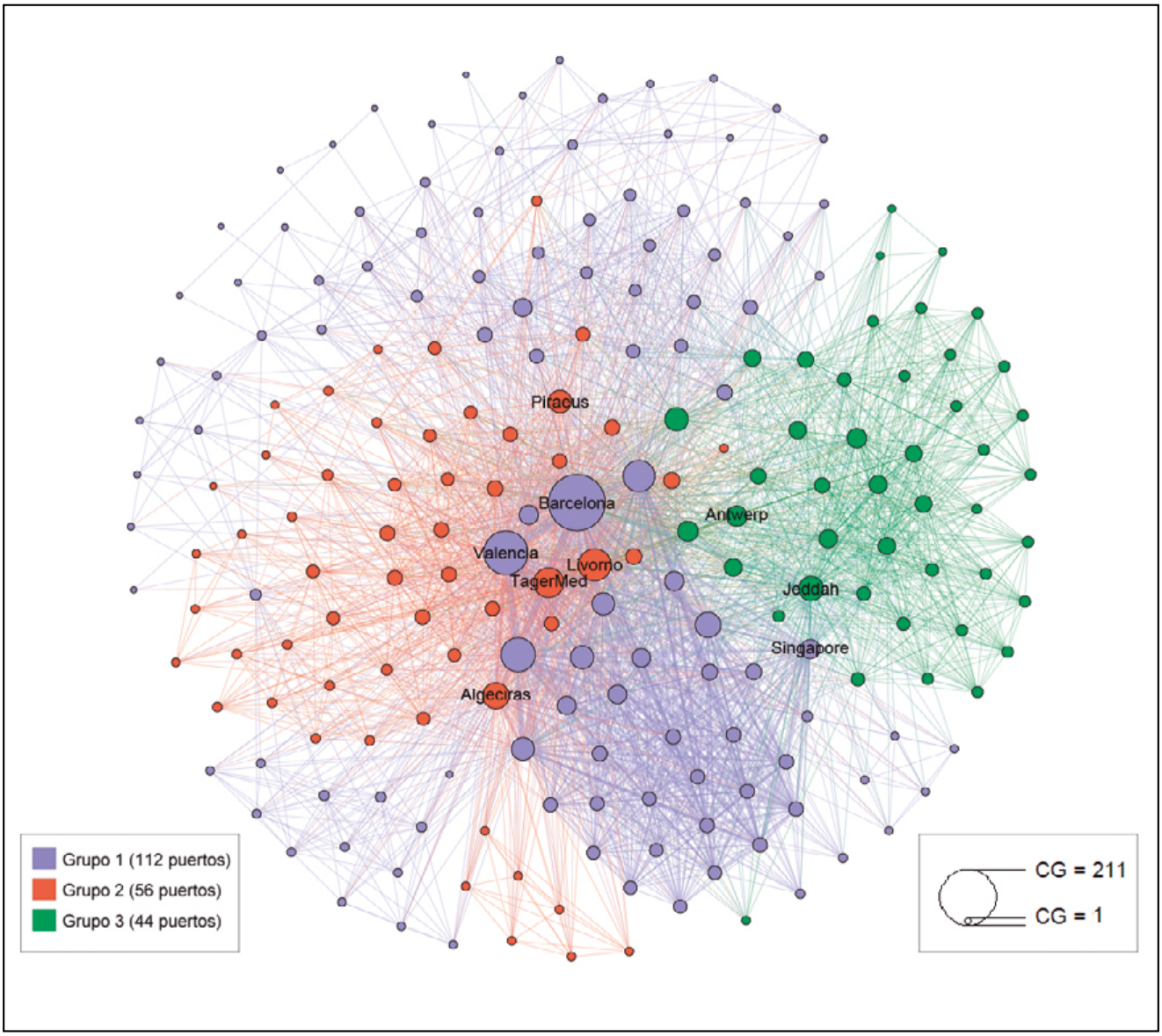


Figura 4. Grupos de puertos en la red marítima de Barcelona.

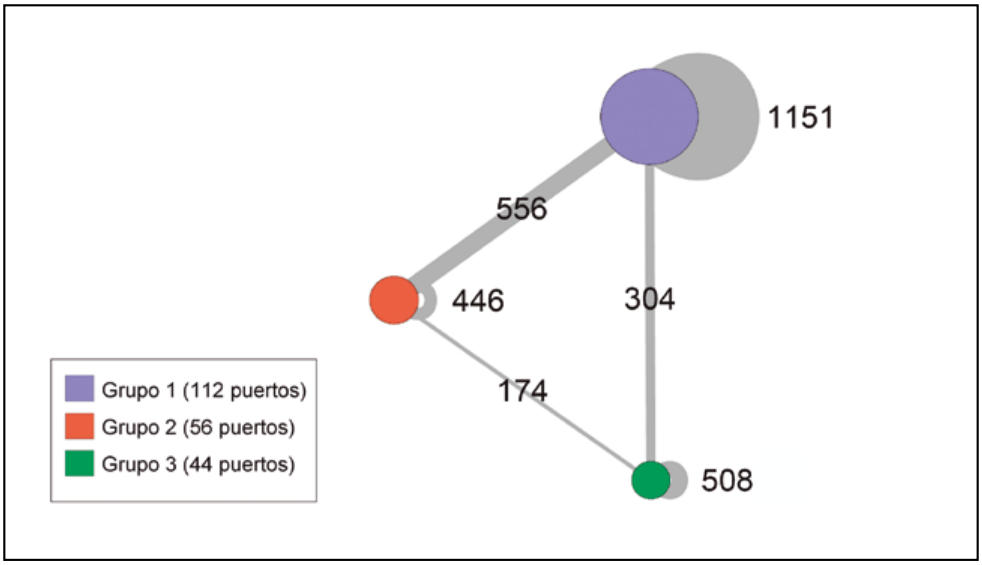


Figura 5. Vínculos entre grupos y dentro del mismo grupo.

geográfica de los puertos y el grupo al que pertenecen. Por ejemplo, los puertos americanos del Pacífico Sur forman parte del mismo grupo y lo mismo sucede en otras áreas del globo como el golfo de México, o el Atlántico Sur. En definitiva, la red marítima de Barcelona no está completamente desconectada de la faceta geográfica o espacial de

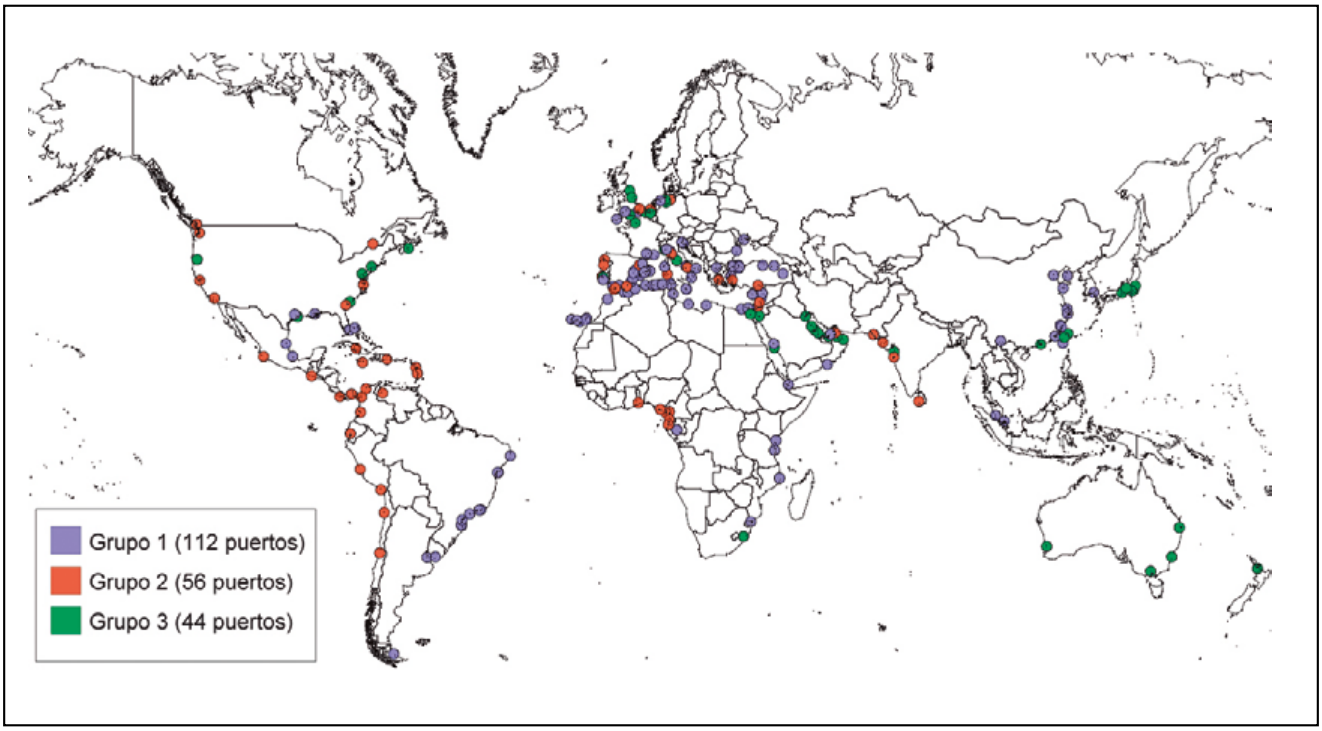


Figura 6. Ubicación de los puertos en la red.

los puertos (distancias). Ahora podemos encontrar una posible respuesta a la pregunta que formulamos anteriormente. ¿Por qué el grupo 3 tiene más conexiones internas que el grupo 2 que sin embargo cuenta con más puertos? La respuesta está en la "fortaleza" de los nodos. Como se observa en la figura 6, el grupo 2 no está presente en ningún puerto del mercado de Asia Oriental, el más potente del mundo y el que aglutina la mayor cantidad de *hubs*. Por tanto, es razonable pensar que los grupos 1 y 3 presentes en esa región tengan una red interna más densamente conectada, producto en parte de la alta competitividad portuaria.

Por otro lado, también es interesante observar que algunos puertos lejanos, en términos de distancia, también forman parte del mismo grupo, es decir, están bien conectados dentro la red. Estos vínculos son especialmente importantes entre algunos puertos del norte de Europa y del lejano oriente (grupos 1 y 3), lo que es coherente con la importancia de los dos polos, Asia como principal generador de manufacturas y Europa como principal receptor de las mismas. Llegados a este punto se debe aclarar que el hecho de que el grupo 2 no esté presente en el lejano oriente, no implica que los puertos de ese grupo no dispongan de enlaces a ese polo. Solo quiere decir que sus vínculos con aquella región son más débiles (tienen un menor número de enlaces). Además, esto solo es estrictamente cierto en la red marítima del puerto de Barcelona, que es la que estamos estudiando. Existen más posibilidades y más conexiones entre puertos en la red global.

Una vez completada la 1ª fase, nos centramos ahora en el análisis de las métricas de centralidad. Al igual que antes, hay que tener en cuenta que los resultados de esta 2ª fase se basan en las métricas calculadas en la red de Barcelona y esto en sí mismo es una limitación. Dejando a un lado el puerto de Barcelona, que lógicamente es el puerto más importante dentro de la red y el que tiene medidas más altas de CG y CI, observamos que en los tres grupos el puerto que tiene mejor conectividad (mayor CG) es también el que proporciona mejor accesibilidad a toda la red (mayor CI). Esto es una señal clara que apunta al puerto más fuerte de cada grupo: Valencia en el grupo 1, Livorno en el grupo 2 y Jeddah en el grupo 3. Los resultados son coherentes con la ubicación y papel de cada puerto. Valencia es el principal competidor de Barcelona como *gateway* en la península ibérica, Livorno juega un papel muy importante en las líneas de *Short Sea Shipping* entre España e Italia, y Jeddah es un puerto de transbordo en la ruta comercial entre el norte de Europa y el sudeste asiático.

La figura 7 separa la red en una triada de grandes polos: América, Europa–África, y Asia–Oceanía. En ella se identifica el grupo/s dominante/s en cada zona marítima, así como algunos corredores marítimos claramente definidos por su grupo. Esta información junto con las medidas de centralidad incluidas en el apéndice, pueden facilitar el proceso de elección de puerto, es decir, la elección del mejor puerto de entrada a un determinado mercado. Aquí se entiende como mejor puerto el que ofrece una mayor versatilidad, es decir, el que ofrece más conexiones locales (CG) y mejor accesibilidad global (CI) al resto de la red.

Por ejemplo, los puertos mejor conectados en la costa americana del Pacífico son todos del grupo 2: Seattle, Vancouver, Long Beach y, más al sur, Manzanillo (México). En la costa americana del atlántico la mejor estrategia sería utilizar conexiones del grupo 1 a través de dos *hubs*: Freeport (Bahamas) para entrar en el golfo de México-Caribe y Santos (Brasil) para operar en el Atlántico Sur. En el continente africano no hay un puerto ni un grupo que destaque especialmente como la mejor opción, a la costa occidental se accede por el grupo 2 mientras que a la oriental se entra por el 1. En Oriente Medio e India son buenos puertos de escala tanto Jeddah (grupo 3) como Colombo (grupo 2). Ambos cuentan con un buen número de servicios desde/hacia otros mercados gracias a su ubicación geográfica.

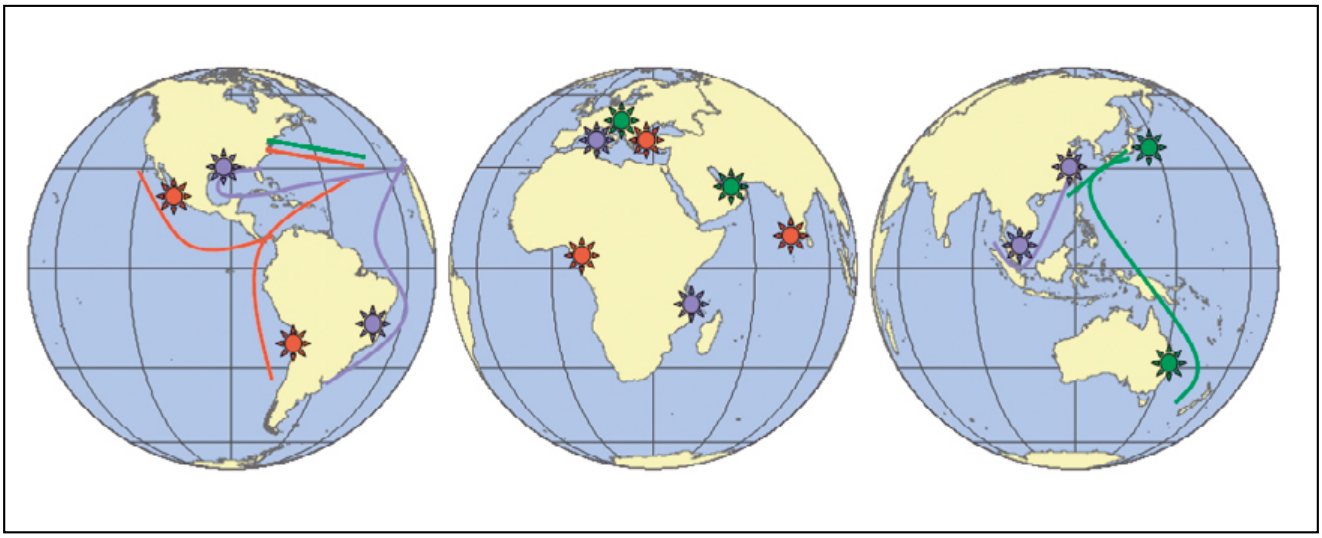


Figura 7. Visión de conjunto. Elección de puerto.

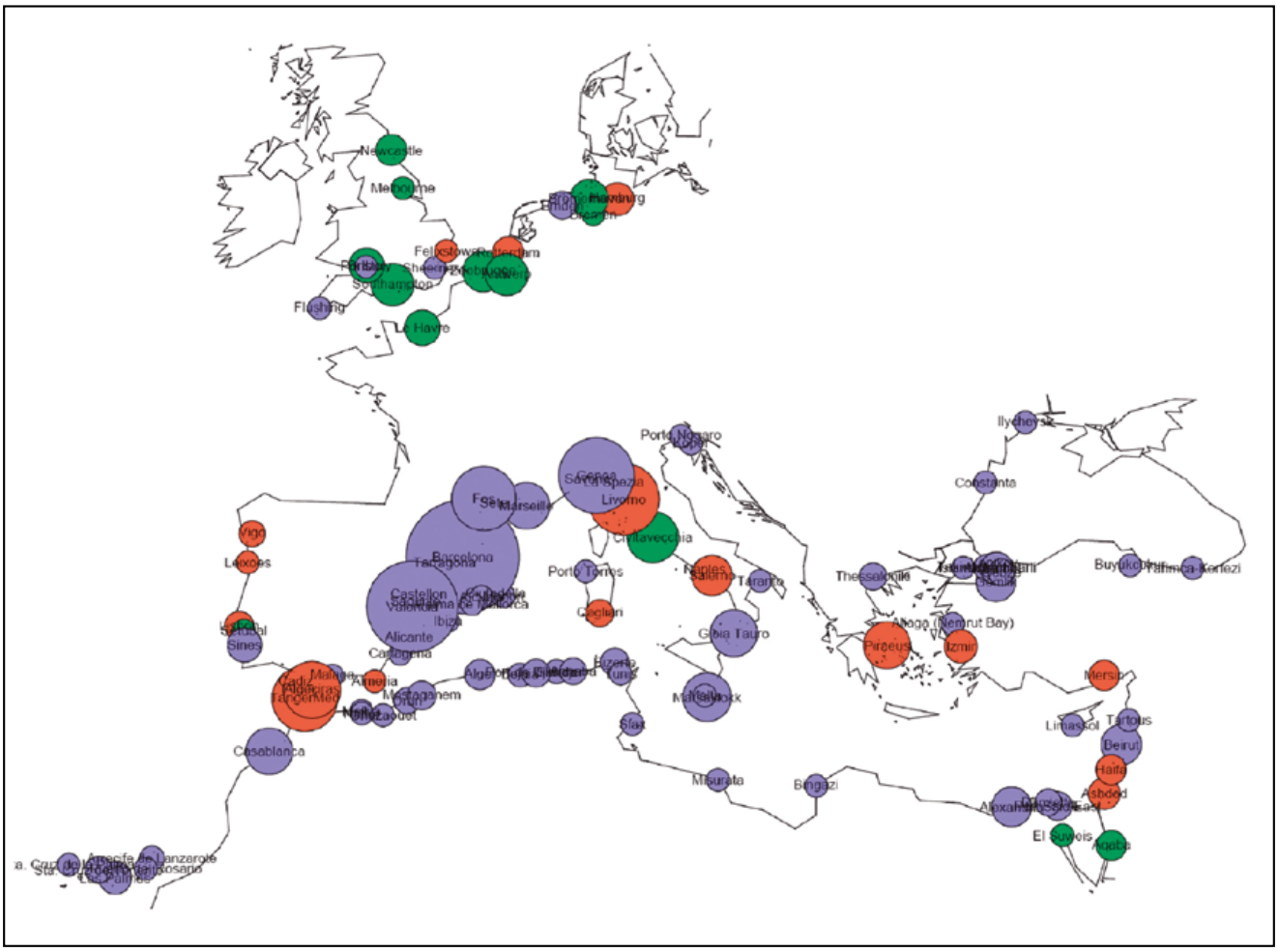


Figura 8. *Network core.* Centralidad de intermediación.

Finalmente, en el sudeste asiático destaca la función de Singapore como nodo intermedio entre puertos del grupo 1 y 3. Finalmente, Japón y Australia solo son accesibles vía puertos del grupo 3.

El caso de Europa en el que se encuentra el núcleo de la red es más complejo, pues se observa una gran variedad de líneas que se entrelazan entre puertos de los tres grupos. Sin embargo, no todos los puertos proporcionan la misma accesibilidad dentro de la red. Ese aspecto se puede descubrir analizando el *network core* de Europa (figura 8) a través de la CI. En esa figura el tamaño de los nodos es proporcional a la centralidad de intermediación (CI). A mayor diámetro, mejor accesibilidad del nodo dentro de la red y en particular dentro de su mismo grupo. Excluyendo Barcelona, que lógicamente es el puerto más importante, destaca el rol protagonista de algunos puertos del grupo 1 como Valencia, Genoa y Livorno. También se observa que los puertos del Estrecho de Gibraltar (TangerMed y Algeciras), con una privilegiada posición a la entrada del mediterráneo, tienen muy buenas conexiones con tres grandes

hubs europeos: Rotterdam, Hamburg y Felixstowe (los tres del grupo 2). Finalmente, en el grupo 3 destaca la influencia de los puertos de Antwerp, Zeebrugge y Bremerhaven como origen/destino en el norte de Europa. Todos los detalles (grupos, CG, CI, etc.) se pueden consultar en el apéndice.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos analizado la red marítima del puerto de Barcelona a través de un enfoque de doble etapa. En primer lugar, la fase de agrupamiento nos permite entender cómo las navieras organizan sus servicios de transporte marítimo de línea en relación con Barcelona. Como resultado de la primera fase y de acuerdo con las clases de modularidad, obtenemos tres grupos de puertos con perfiles de conexión similares. Aunque los principales puertos y corredores hacia y desde Barcelona no son visibles *a priori,* se pueden deducir fácilmente a través de la geo-localización de los nodos. La segunda etapa se centra en el análisis de la centralidad y permite comprender mejor cómo se distribuye la influencia a través de la red, arrojando luz sobre los puertos dominantes.

Nuestros hallazgos son importantes no sólo desde la perspectiva de las navieras interesadas en el diseño de servicios regulares, sino también desde la perspectiva del puerto de Barcelona. La Autoridad Portuaria de Barcelona cuenta ahora con una valiosa referencia para fomentar el tráfico y atraer volúmenes de transbordo. Por ejemplo, puede utilizar los resultados de la investigación para reforzar la cooperación con otros puertos, los puertos más centrales de la red, mediante acuerdos de hermanamiento o de colaboración.

Somos conscientes de que nuestra investigación tiene una serie de limitaciones y esto es importante para evitar una generalización excesiva de los resultados. En primer lugar, la CG mide el número de conexiones sin tener en cuenta su calidad. Sin embargo, en la vida real, la calidad de los servicios marítimos también desempeña un papel importante. Por ejemplo, no es lo mismo la conexión de un servicio de transporte marítimo de corta distancia, con buques portacontenedores de pequeño porte, que la de un servicio de transporte marítimo transoceánico con barcos de gran porte.

En segundo lugar, el tráfico marítimo entre dos puertos no siempre asumirá el trayecto más corto por fuerza. En la práctica, el transporte marítimo de línea regular opera en un entorno más complejo y dinámico caracterizado por numerosos factores, como las políticas de transbordo, la estructura de la demanda, la capacidad de los buques, la competencia portuaria, etc. En este sentido, también es importante remarcar que el estudio da una visión estática de la red, cuando en la práctica las compañías navieras pueden ajustar en cierta medida sus servicios a la demanda existente, es decir, la red puede sufrir modificaciones (la red es dinámica).

Por último, pero no menos importante, hemos estudiado sólo una parte de la red global. Así, cuando analizamos la accesibilidad portuaria (es decir, la ruta que usan los buques para completar la conexión entre pares dos puertos), sólo consideramos una fracción de las rutas marítimas posibles (exclusivamente las incluidas en la red de Barcelona). En otras palabras, hay más servicios de línea y más posibilidades dentro de la red marítima mundial.

Dejando a un lado estas consideraciones, nuestra investigación indudablemente ha arrojado luz sobre la red marítima del puerto de Barcelona. El trabajo futuro debería orientarse hacia la adición de nuevos atributos a los nodos y a sus conexiones dentro de la red actual. Por ejemplo, aquí hemos analizado la red como un grafo ponderado y no dirigido, sin embargo, si consideramos la dirección real de las conexiones podremos obtener una información más completa de la red. Así, en el caso de la CG obtendremos dos nuevas medidas. La primera definirá el número de conexiones que apuntan a los nodos (CG de entrada), mientras que la segunda definirá el número de conexiones que los nodos dirigen a otros (CG de salida). Esta distinción será crucial para revelar el papel de cada puerto como atractor o emisor de servicios regulares de línea. Además, en el futuro también podría considerarse la posibilidad de ampliar la red, incluyendo un mayor número de puertos y servicios.

6. REFERENCIAS

Ansorena, Í.L. (2018). Bilateral connectivity in the liner shipping network: an overview. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 7(4): pp. 295-309.

Ansorena, Í.L. (2020). Analysing the maritime network of the port of Algeciras Bay. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 9(3): pp. 245-263.

Ansorena, Í.L., y Valdecantos, V.N. (2021). The port of Valencia maritime network: an analysis of centralities and tree-optimisation. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 39(1): pp.127–139.

Autoridad Portuaria de Barcelona (2018). Puerto de Barcelona. *Memoria Estadística 2017*. Barcelona: Autoridad Portuaria de Barcelona.

Autoridad Portuaria de Barcelona (2020). El Port de Barcelona cerró 2019 con una cifra de negocio de 172 millones de euros. *Memoria Anual 2019*. http://www.portdebarcelona.cat/es/home_apb

Bartholdi, J., Jarumaneeroj, P., y Ramudhin, A. (2016). A new connectivity index for container ports. *Maritime Economics and Logistics*, 18(3): pp. 231-249.

Blondel, V.D., Guillaume, J.L., Lambiotte, R., y Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, nº 10, p.10008. https://doi.org/10.48550/arXiv.0803.0476

Brandes, U. (2001). A Faster Algorithm for Betweenness Centrality. *Journal of Mathematical Sociology*, 25(2): pp.163-177.

Caschili, S., Medda, F., Parola, F., y Ferrari, C. (2014). An Analysis of Shipping Agreements: The Cooperative Container Network. *Networks and Spatial Economics*, 14(3): pp. 357-377.

Ducruet, C., y Notteboom, T. (2012). The Worldwide Maritime Network of Container Shipping: Spatial Structure and Regional Dynamics. *Global Networks*, 12(3): pp. 395-423. https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2011.00355.x

Freeman, L.C. (1977). A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, 40(1): pp. 35-41.

González Laxe, F., Freire, M.J., y Pais Montes, C. (2015). La conectividad de los puertos españoles del Mediterráneo. *Investigaciones Regionales – Journal of Regional Research*, nº 31, pp. 7-34.

Kaluza, P., Kölzsch, A., Gastner, M.T., y Blasius, B. (2010). The Complex Network of Global Cargo Ship Movements. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(48): pp.1093-1103. https://doi.org/10.1098/rsif.2009.0495

Kringelum, L.B. (2019). Reviewing the challenges of port authority business model innovation. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 8(3): pp. 265-291.

Lancichinetti, A., y Fortunato, S. (2009). Community detection algorithms: a comparative analysis. *Physical Review E*, 80(5): pp. 1-12. https://doi.org/10.48550/arXiv.0908.1062

Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Park, K.S., Seo, Y.J., y Kim, R. (2017). Seaport Network based on Change of Korean Liner Service Pattern. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 33(4): pp. 221-228. https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.12.005

Rodrigue, J.P. (2017). *The Geography of Transport Systems* (3rd ed.). New York, US: Routledge.

Traag, V.A., Waltman, L., y van Eck, N.J. (2019). From Louvain to Leiden: guaranteeing well-connected communities. *Scientific Reports*, 9: 5233. https://doi.org/10.1038/s41598-019-41695-z

UNCTAD (2019). *Review of Maritime Transport 2019*. New York, US: United Nations Publications.

Wang, L., Zhu, Y., Ducruet, C., Bunel, M., y Lau Y. (2017). From hierarchy to networking: the evolution of the "twenty-first-century Maritime Silk Road" container shipping system. *Transport Reviews*, 38(4): pp. 416-435. https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1441923

Wang, Y., y Cullinane, K. (2011). Network Flow Analysis of Freight Traffic Consolidation in the Container Port Industry. *Annual Conference of the International Association of Maritime Economists (IAME 2011), Santiago de Chile, October 25-28.*

Wang, Y., y Cullinane, K. (2016). Determinants of port centrality in maritime container transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,* Vol. 95, pp. 326-340. http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.04.002

7. APÉNDICE

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Barcelona	465	211	6105	7697,48	1
Valencia	398	160	4793	2445,32	1
Genoa	276	119	3893	1224,35	1
Fos	173	109	3439	691,47	1
Jebel Ali	128	83	2919	285,11	1
Marsaxlokk	271	72	3399	238,89	1
Gioia Tauro	110	73	2034	209,36	1
Casablanca	21	54	230	205,30	1
Marseille	24	57	283	202,08	1
La Spezia	177	70	2296	168,77	1
Singapore	174	57	2527	140,59	1
Beirut	73	57	1911	106,26	1
Alexandria	11	41	165	99,91	1
Gemlik	19	37	230	96,03	1
Altamira	60	43	1540	53,07	1
Veracruz	60	43	1540	53,07	1
Freeport (Bah)	49	54	1599	44,68	1
King Abdullah	49	54	1599	44,68	1
Sines	58	54	1599	44,68	1
Sagunto	8	36	132	40,82	1
Las Palmas	21	23	199	32,45	1
Istanbul	8	38	139	31,75	1
Castellón	15	18	131	20,36	1
Alger	12	24	88	18,61	1
Miami	74	39	1712	14,72	1
Alicante	13	15	57	13,98	1
Salalah	48	38	1376	12,09	1
Port Said East	132	38	2664	12,09	1
Mostaganem	12	33	130	11,76	1
Bizerte	5	14	44	8,88	1
Derince	6	32	120	8,81	1
Port de Djendjen	9	32	120	8,81	1
Sete	5	27	89	8	1
Emden	4	17	48	7,62	1
Thessaloniki	14	11	106	6,58	1
Qingdao	95	37	2205	6,46	1
Ningbo	95	37	2205	6,46	1
Busan	95	37	2205	6,46	1
Shanghai	120	37	2205	6,46	1
Yantian	135	37	2205	6,46	1
Salvador	18	20	252	5,62	1
Itapoa	27	20	252	5,62	1
Santos	36	20	252	5,62	1
Sta. Cruz de Tenerife	16	12	64	5,47	1
New Orleans	56	35	1496	5,13	1
Houston	56	35	1496	5,13	1
Shekou	65	36	1695	5,02	1
Annaba	6	18	62	4,76	1
Istanbul-Ambarli	12	14	106	4,66	1
Damietta	70	22	655	4,39	1
Gebze	4	17	50	4,03	1
Oran	6	17	59	3,48	1
Xiamen	70	34	1830	1,73	1
Nansha	70	34	1830	1,73	1
Arrecife de Lanzarote	6	9	40	0,96	1
Skikda	5	15	54	0,22	1
Bejaia	5	15	54	0,22	1
Port Everglades	40	32	1320	0	1
Dalian	40	32	1320	0	1
Naples	40	32	1320	0	1
Xingang	40	32	1320	0	1
Tartous	3	26	81	0	1
Koper	3	26	81	0	1
Constanta	3	26	81	0	1
Limassol	3	26	81	0	1
Buyukcukur	3	26	81	0	1
Ilychevsk	3	26	81	0	1
Tunis	4	26	83	0	1
Malta	6	26	81	0	1
Port Kelang	30	16	510	0	1

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Kaohsiung	25	15	375	0	1
Tekirdag	3	14	42	0	1
Suape	9	14	135	0	1
Navegantes	9	14	135	0	1
Paranagua	9	14	135	0	1
Montevideo	9	14	135	0	1
Rio de Janeiro	18	14	135	0	1
Flushing	3	13	42	0	1
Portbury	3	13	42	0	1
Yenikoy	3	13	42	0	1
Itajai	9	12	117	0	1
Buenos Aires	9	12	117	0	1
Rio Grande	9	12	117	0	1
Sepetiba (Itaguai)	18	12	117	0	1
Maputo	4	11	48	0	1
Nacala	4	11	48	0	1
Djibouti	8	11	48	0	1
Mombasa	8	11	48	0	1
Dar es Salaam	8	11	48	0	1
Bingazi	4	8	36	0	1
Misurata	4	8	36	0	1
Sfax	4	8	36	0	1
Aliaga (Nemrut Bay)	10	8	90	0	1
Yarimca-Korfezi	10	8	90	0	1
Ambarli	1	7	8	0	1
Sta. Cruz de la Palma	2	6	14	0	1
Ghazaouet	2	6	14	0	1
Puerto del Rosario	3	6	21	0	1
Cartagena	3	6	21	0	1
Málaga	4	6	14	0	1
Sheerness	1	5	6	0	1
Cádiz	2	5	12	0	1
Mellila	2	5	12	0	1
Porto Nogaro	4	4	16	0	1
Taranto	4	4	16	0	1
Nador	3	3	10	0	1
Mahón	1	2	3	0	1
Porto Torres	2	2	3	0	1
Alcudia	2	2	6	0	1
Ciutadella	4	2	6	0	1
Palma de Mallorca	4	2	9	0	1
Ibiza	2	1	4	0	1
Livorno	106	111	1603	1000,69	2
TangerMed	148	101	1661	741,95	2
Algeciras	163	86	2741	450,84	2
Piraeus	41	72	691	211,73	2
Salerno	39	44	538	106,84	2
Hamburg	14	44	369	35,77	2
Izmir	24	30	300	34,16	2
Savannah	45	42	729	26,49	2
Ashdod	39	35	513	25,69	2
Rotterdam	12	40	318	22,57	2

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Manzanillo (Pan)	28	31	472	20,87	2
Cartagena (Col)	40	31	472	20,87	2
Mersin	22	19	270	19,28	2
Caucedo	40	31	596	19,05	2
Haifa	27	37	513	18,19	2
Seattle	21	39	483	15,55	2
Vancouver	21	39	483	15,55	2
Manzanillo (Mex)	33	39	483	15,55	2
Oakland	33	39	483	15,55	2
Long Beach	33	39	483	15,55	2
Lisbon	19	23	262	12,65	2
Tarragona	39	16	255	11,26	2
Mundra	29	36	559	7,78	2
Karachi	29	36	559	7,78	2
Mumbai-Nhava Sheva	29	36	559	7,78	2
Cagliari	46	22	534	6,75	2
Vigo	4	13	36	4,01	2
Norfolk (Va)	36	18	450	2,84	2
Cristóbal	9	30	279	0	2
Montreal	9	30	279	0	2
Colombo	9	30	279	0	2
Felixstowe	18	30	279	0	2
Balboa	18	30	279	0	2
Ilo (Per) (1/2-B)	12	17	216	0	2
Antofagasta (1/2-A)	12	17	216	0	2
Buenaventura	12	17	216	0	2
Kingston	12	17	216	0	2
Callao	12	17	216	0	2
San Antonio	12	17	216	0	2
Guayaquil	24	17	216	0	2
Puerto Quetzal	12	16	204	0	2
Port Gentil	3	13	42	0	2
Douala	3	13	42	0	2
Malabo	3	13	42	0	2
Onne (1/2)	3	13	42	0	2
Bata	3	13	42	0	2
Libreville	3	13	42	0	2
Lome	6	13	42	0	2
Khor Fakkan	20	13	280	0	2
Turbo	4	12	52	0	2
Fort de France	4	12	52	0	2
Moin (~Puerto Limon)	4	12	52	0	2
Pointe Pitre	8	12	52	0	2
Leixoes	3	10	30	0	2
Almeria	3	10	30	0	2
Mariel (Havana)	4	6	28	0	2
Jeddah	146	79	2065	369,98	3
Civitavecchia	27	74	685	298,87	3
Southampton	42	58	882	133,17	3
Antwerp	33	62	795	130,75	3
New York	61	61	1113	123,87	3

Puerto	Frecuencia	CG	CGP	CI	Grupo
Zeebrugge	29	49	563	110,13	3
Durban	34	49	754	105,02	3
Halifax	42	42	690	89,05	3
Bremerhaven	39	51	840	79,45	3
Abu Dhabi	39	53	852	77,71	3
Savona	14	47	221	74,18	3
Charleston	25	50	663	62,21	3
Le Havre	20	43	403	55,68	3
Bristol	23	40	467	49,66	3
Bahrain	35	46	796	41,48	3
Kuwait	35	46	796	41,48	3
Hong Kong	39	35	697	39,38	3
Newcastle	17	33	361	22,56	3
Aqaba	20	33	440	17,11	3
Damman	9	25	146	8,20	3
Sohar	21	30	474	5,21	3
Doha	21	30	474	5,21	3
Port Elizabeth	16	24	384	0	3
Melbourne	16	24	384	0	3
Brisbane	16	24	384	0	3
Bombay	16	24	384	0	3
Fremantle	16	24	384	0	3
Port Kembla	16	24	384	0	3
Brunswick	16	24	384	0	3
Chiba	14	23	322	0	3
Keelung	14	23	322	0	3
Muscat	14	23	322	0	3
Bremen	14	23	322	0	3
Hitachi	14	23	322	0	3
Setubal	14	23	322	0	3
Yokosuka	14	23	322	0	3
Yokohama	14	23	322	0	3
Taichung	14	23	322	0	3
Toyohashi	14	23	322	0	3
El Suweis	5	17	90	0	3
Jubail	4	13	56	0	3
Baltimore	4	10	44	0	3
Jacksonville	4	10	44	0	3
Galveston	4	10	44	0	3