

# Simulación de tráfico marítimo en puertos. Aplicación en el puerto de Palma de Mallorca

## *Simulations of Operations and Maritime Traffic in Ports. Application in the Port of Palma de Mallorca*

Marta Jiménez Saavedra<sup>1</sup>, José M. Grassa Garrido<sup>2\*</sup>, Jorge Nasarre López<sup>3</sup>

### Resumen

Se describe un marco conceptual de representación de un puerto apropiado para el estudio de las operaciones del tráfico marítimo. El empleo de este marco junto con registros de la actividad real del tráfico, tablas de llegadas y datos del Sistema de Identificación Automática (SIA), permite establecer un modelo de Simulación Discreta de Eventos (SDE) para la evaluación del servicio bajo diferentes niveles de intensidad en las llegadas, analizando, por ejemplo, la efectividad de diferentes modos de regulación de tráfico y programación de operaciones. Estas simulaciones de situaciones operativas se pueden extender para su empleo en el estudio de futuros desarrollos portuarios mediante el uso complementario de datos obtenidos mediante simulación de maniobras de buques. Finalmente se presenta un caso práctico de aplicación de estas técnicas en el puerto de Palma de Mallorca

**Palabras clave:** tráfico marítimo, puertos, simulación, Sistema de Identificación Automática (SIA), maniobras.

### Abstract

*A conceptual frame for the representation of a port oriented to the study of maritime traffic operations is described; the use of this framework, jointly with present activity records, arrival tables, and Automatic Information System (AIS) messages allow for the establishment of a Discrete Event Simulator (DES) to be used for service evaluation under different arrival intensity levels analyzing, for example, the effectiveness of alternative traffic regulations and operational programming. These simulations of operational situations may be extended for the study of port development planning by the complementary use of data obtained through ship maneuvering simulation. A practical case of application of the aforementioned techniques at the Palma de Mallorca port is finally presented.*

**Keywords:** marine traffic, ports, simulation, Automatic Information System (AIS), ship manoeuvres.

## 1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de los muelles es un factor principal en la potencialidad de transferencia de mercancías y pasajeros en un puerto y también de los diferentes niveles de calidad de servicio que puede ofrecer en función de la carga soportada en cada momento. Este aspecto es objeto de la mayor atención en los estudios de planificación portuaria, siendo la asignación de atraque y el análisis de los tiempos de espera y niveles de congestión un ejemplo clásico de aplicación de la teoría de colas (Rodríguez Pérez, 1977), y de utilización de modelos de simulación discreta de eventos (*Discrete Event Simulation* DES), y técnicas de investigación operativa para abordar con complejidad creciente las operaciones portuarias y hasta la actual tendencia a la implantación de “gemelos digitales”, véase (de la Peña *et al.* 2019), (Taylor *et al.* 2019). Aunque el coste y

plazo de implementación de nuevas infraestructuras hace que en muchas ocasiones el problema pueda considerarse fuertemente jerarquizado por este aspecto, otros factores tales como la disponibilidad de superficie en los patios de mercancías, medios de carga, descarga y manipulación, automatización de las operaciones, accesos terrestres y marítimos pueden tener también una influencia decisiva.

Este trabajo se centra en el estudio de la capacidad de los accesos marítimos y áreas de maniobra para sostener los niveles requeridos de tráfico de buques y, a su vez, permita un aprovechamiento adecuado de un conjunto de instalaciones portuarias. La capacidad resultante no ha de ser un factor limitativo, como podría suceder en situaciones alejadas de lo que se definiría tradicionalmente como una situación de congestión de muelles si, por ejemplo, se producen estancias de barcos en puerto de muy corta duración que llevan aparejado un tráfico marítimo-portuario de especial intensidad. En este sentido, es de destacar casos como el del puerto de Barcelona, que ha abierto una segunda bocana que independiza determinados tráficos y reduce la intensidad de tráfico en la bocana tradicional, mientras que otros (por ejemplo, los puertos de Valencia y Algeciras) han desarrollado nuevas terminales con bocanas independientes. En el caso del puerto de Palma de Mallorca, los requisitos asociados a los tráficos

\* Autor de contacto: Jose.M.Grassa@cedex.es

<sup>1</sup> Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

<sup>2</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

<sup>3</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ports de Balears.

de suministro insular con coincidencia horaria en las entradas y el extraordinario desarrollo en los últimos años del tráfico de cruceros turísticos, hacen que en el puerto, aun con niveles reducidos de ocupación de muelles, se puedan producir conflictos en el acceso al puerto por la coincidencia de operaciones de entrada. Algunos de los métodos de estudio que se presentan en este trabajo han sido motivados por la colaboración del CEDEX con la Autoridad Portuaria de Baleares y Puertos del Estado para analizar posibles programaciones de operaciones que permitan un desarrollo fluido del tráfico en futuras configuraciones de sus instalaciones.

Este trabajo presenta un conjunto de técnicas para el estudio del tráfico marítimo en puertos, incluyendo la definición de un marco de referencia geométrico-topológico de las zonas marítimas del puerto, mediante la aplicación de conceptos de teoría de grafos, la caracterización de las operaciones de buques en función de su tipo y destino y tanto en situaciones reales como de proyecto. Esta última empleando datos del Sistema de Identificación Automática (AIS), véase Tortosa y Rebollo, 2010, y datos derivados de simulaciones realistas de maniobras de buques. Todo ello se aborda mediante simulaciones discretas de las operaciones y, por agregación, del tráfico en su conjunto, con la finalidad de evaluar alternativas que permitan obtener una adecuada fluidez del tráfico en instalaciones disponibles o para ayudar en el diseño de futuras alternativas.

## 2. MARCO PARA LA DESCRIPCIÓN DEL TRÁFICO EN LA ZONA MARÍTIMA DEL PUERTO

Un marco lógico para una descripción sucinta y extensible a cualquier nivel de detalle de la navegación de los buques en las aguas portuarias, puede establecerse considerando el conjunto de elementos que componen sus áreas navegables (los fondeaderos, los canales de acceso, las dársenas y el muelle) y las conexiones entre ellos. Se describe a continuación un grafo o red, que como estructura de geometría topológica en este caso resulta aplicable, tal y como se describe a continuación.

### 2.1. Modelización del puerto mediante un grafo

Un grafo o red se define de forma abstracta mediante un conjunto de vértices y lados que los unen de una forma determinada, definiendo una conectividad entre sus vértices y como consecuencia una topología. Los vértices pueden representar diversos tipos de objetos mientras que los lados representan relaciones entre los vértices que unen, ya sea de tipo unidireccional o bidireccional. Como representación simbólica, estas estructuras están soportadas por un importante bagaje teórico de propiedades y algoritmos genéricos. En el ámbito del transporte (Rodrigue *et al.* 2013) las redes son de particular utilidad, representándose, por ejemplo, terminales o intersecciones como vértices o nodos de la red mientras que los lados representan las vías o rutas de conexión existentes entre los nodos. Esta infraestructura con propiedades adecuadas asignadas a nodos y conexiones permite, por ejemplo, obtener la capacidad de flujo entre diferentes nodos o la ruta mínima entre ellos, el conocido algoritmo de Dijkstra.

### 2.2.1. Estados y eventos de los barcos durante una estancia en puerto

En esta aplicación para caracterizar el tráfico marítimo en un puerto se han definido como vértices del grafo los estados significativos de los barcos a lo largo de su estancia: navegación en una zona de acceso, navegación en el interior de una dársena, atraque en un muelle determinado. Estos estados quedan, por tanto, asociados a unas determinadas regiones geográficas, áreas navegables o de atraque o fondeo de interés, y a su vez quedan relacionados mediante los lados -enlaces- que representan los eventos de cambio de estado: por ejemplo, el evento de paso de “navegando en dársena” al estado “atracado en muelle” o viceversa.

Una vez que se ha definido el grafo, una estancia de un barco en puerto queda representada concisamente por una secuencia de estados sucesivos que forman un recorrido en el grafo; una estancia bien definida deberá ser un recorrido que tenga como estado inicial y final la navegación en el exterior del puerto, un circuito de recorrido del grafo en su terminología y cuyos eventos de cambio de estado estén entre los permitidos en su definición, es decir, dicho evento está incluido entre los posibles entre cada par de estados sucesivos. El grafo debe ser completo en el sentido de que, dado un barco que realiza una estancia en puerto, su situación debe quedar descrita en todo momento por un estado en el grafo. En este caso, para el puerto de Palma (de Mallorca) se han definido los vértices o estados correspondientes a la navegación o permanencia en las zonas que se indican en la tabla 1.

**Tabla 1.** Definición de zonas del puerto de Palma

| Nombre del Estado | Descripción                                        |
|-------------------|----------------------------------------------------|
| S0.N              | Fuera de Puerto                                    |
| SZ2.N             | Zona 2                                             |
| SZ1.N             | Zona 1                                             |
| SNB.N             | Dársena N                                          |
| S1.A              | Primer tramo ext. Muelles comerciales              |
| S2.A              | Testero Muelles comerciales                        |
| S3.A              | Muelle y prolongación Muelle adosado               |
| S25.A             | Ampliación Muelle Poniente                         |
| S26.A             | 1ª Alineación de Poniente Norte                    |
| S27.A             | 2ª Alineación de Poniente Norte                    |
| SSWB.N            | Dársena SW                                         |
| S28.A             | 2ª Alineación de Poniente Sur                      |
| S29.A             | 1ª Alineación de Poniente Sur                      |
| S30.A             | Muelle de Paraires                                 |
| S31.A             | Dársena de Portopi                                 |
| S32.A             | Muelle de Ribera de San Carlos                     |
| S33.A             | 1ª Alineación Dique del Oeste                      |
| S34.A             | Alineación Oeste plataforma adosada al Dique Oeste |
| S35.A             | Alineación Norte plataforma adosada al Dique Oeste |
| S36.A             | Alineación Este plataforma adosada al Dique Oeste  |
| S37.A             | 2ª Alineación Dique del Oeste                      |
| S38.A             | 3ª Alineación Dique del Oeste                      |

Con lo que una estancia de un barco en el puerto queda definida por una secuencia completa de estados, frecuentemente simétrica, por ejemplo:

1. S0.N Navegación Fuera de puerto
2. SZ2.N Navegación Zona II
3. SZ1.N Navegación Zona I
4. SSWB.N Navegación Dársena SW

**Tabla 2.** Nombres y descripción de los eventos de cambio de estado

| Evento  | Descripción                                                | Evento  | Descripción                                               |
|---------|------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------|
| EZ2+.N  | Entrada a Puerto                                           | EZ2-.N  | Salida de Puerto                                          |
| EZ1+.N  | Entrada a Zona 1                                           | EZ1-.N  | Salida de Zona 1                                          |
| ENB+.N  | Entrada Dársena N                                          | ENB-.N  | Salida Dársena N                                          |
| E1+.A   | Entrada Primer tramo ext. Muelles comerciales              | E1-.A   | Salida Primer tramo ext. Muelles comerciales              |
| E2+.A   | Entrada Testero Muelles comerciales                        | E2-.A   | Salida Testero Muelles comerciales                        |
| E3+.A   | Entrada Muelle y prolongación Muelle adosado               | E3-.A   | Salida Muelle y prolongación Muelle adosado               |
| E25+.A  | Entrada Ampliación Muelle Poniente                         | E25-.A  | Salida Ampliación Muelle Poniente                         |
| E26+.A  | Entrada 1ª Alineación de Poniente Norte                    | E26-.A  | Salida 1ª Alineación de Poniente Norte                    |
| E27+.A  | Entrada 2ª Alineación de Poniente Norte                    | E27-.A  | Salida 2ª Alineación de Poniente Norte                    |
| ESWB+.N | Entrada Dársena SW                                         | ESWB-.N | Salida Dársena SW                                         |
| E28+.A  | Entrada 2ª Alineación de Poniente Sur                      | E28-.A  | Salida 2ª Alineación de Poniente Sur                      |
| E29+.A  | Entrada 1ª Alineación de Poniente Sur                      | E29-.A  | Salida 1ª Alineación de Poniente Sur                      |
| E30+.A  | Entrada Muelle de Paraires                                 | E30-.A  | Salida Muelle de Paraires                                 |
| E31+.A  | Entrada Dársena de Portopi                                 | E31-.A  | Salida Dársena de Portopi                                 |
| E32+.A  | Entrada Muelle de Ribera de San Carlos                     | E32-.A  | Salida Muelle de Ribera de San Carlos                     |
| E33+.A  | Entrada 1ª Alineación Dique del Oeste                      | E33-.A  | Salida 1ª Alineación Dique del Oeste                      |
| E34+.A  | Entrada Alineación Oeste plataforma adosada al Dique Oeste | E34-.A  | Salida Alineación Oeste plataforma adosada al Dique Oeste |
| E35+.A  | Entrada Alineación Norte plataforma adosada al Dique Oeste | E35-.A  | Salida Alineación Norte plataforma adosada al Dique Oeste |
| E36+.A  | Entrada Alineación Este plataforma adosada al Dique Oeste  | E36-.A  | Salida Alineación Este plataforma adosada al Dique Oeste  |
| E37+.A  | Entrada 2ª Alineación Dique del Oeste                      | E37-.A  | Salida 2ª Alineación Dique del Oeste                      |
| E38+.A  | Entrada 3ª Alineación Dique del Oeste                      | E38-.A  | Salida 3ª Alineación Dique del Oeste                      |

5. S35.A Estancia Alineación Norte plataforma adosada al Dique Oeste
6. SSWB.N Navegación Dársena SW
7. SZ1.N Navegación Zona I
8. SZ2.N Navegación Zona II
9. S0.N Navegación Fuera de puerto

Cada estado se corresponde entonces con una zona geográfica definida y, para cada barco, un estado queda asociado a un periodo de tiempo (intervalo entre atraque y desatraque en el estado 5 del ejemplo) y opcionalmente con otros elementos de caracterización (por ejemplo, velocidad media durante la navegación en el estado 2 del ejemplo o calado del barco). Una vez definida una estancia por este procedimiento, es fácil recuperar si se desea información detallada asociada, como por ejemplo la trayectoria concreta recorrida en el intervalo de tiempo definido para un estado determinado.

Las zonas definidas no tienen por qué cubrir exhaustivamente todos los posibles estados asociados a todos los posibles barcos en el puerto, sino tan sólo aquellas zonas que resulten de interés para estudio. Complementariamente a lo anterior, la tabla 2 recoge los eventos de cambio de estado modelizados en el grafo cuyos estados son los de la tabla 1, todos aquellos físicamente realizables de forma directa, esto es, sin pasar por un estado intermedio. Como se puede ver en la tabla, se definen eventos diferentes, unidireccionales, para operaciones simétricas, generalmente de entrada/salida de una zona, que quedan denotadas mediante un signo “+” o “-” en el nombre correspondiente.

Hay que señalar que los lados del grafo definidos en la tabla 2 para este caso definen la topología del puerto y, por tanto, los sucesivos cambios de estado que son admisibles, sirviendo de elemento de guía para el análisis de las operaciones marítimas y su simulación.

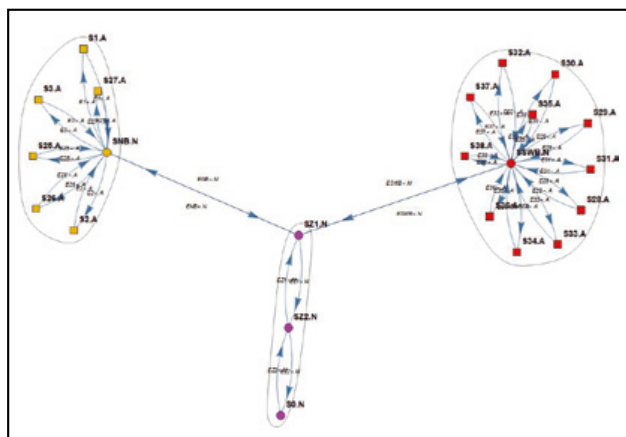
existentes entre estados mediante los eventos correspondientes. Para ello se puede utilizar una estructura matricial, matriz de adyacencia, en la que cada fila/columna corresponde y sigue el orden de los estados presentados en la tabla 1, indicando los valores no nulos la existencia de un evento de relación entre los estados correspondientes a la fila/columna. La figura 1 muestra la estructura de la matriz de adyacencia de este caso, junto con el vector de estados definidos en la tabla 1, el valor 1 en la columna 12 de la fila 11 corresponde con el evento de finalización de la navegación en la dársena SW del puerto (SSWB.N) para atraque en el muelle de la segunda alineación del dique de poniente Sur (S28.A).

**Figura 1.** Vector de estados y matriz de adyacencia del grafo del puerto de Palma de acuerdo con los estados definidos en la tabla 1.

### 2.2.2. Definición del grafo

Una vez definidos los elementos del grafo, estados y eventos, éste se puede definir indicando las relaciones o conexiones

Una representación lógica del grafo con sus estados y eventos de enlace se muestra en la figura 2, con círculos



**Figura 2.** Representación agrupada del grafo del puerto de Palma.

representando los estados de navegación y cuadrados los de atraque. El grupo central incluye los estados de navegación fuera de las dársenas, comunes a todas las estancias en puerto, mientras que el subgrafo de la derecha, articulado en el estado SSWB.N, de navegación en la dársena, incluye como ramas los diferentes atraques en la dársena SW y, a su vez, el grupo de la izquierda se articula en el estado de navegación en la dársena norte, SNB.N, incluyendo sus atraques.

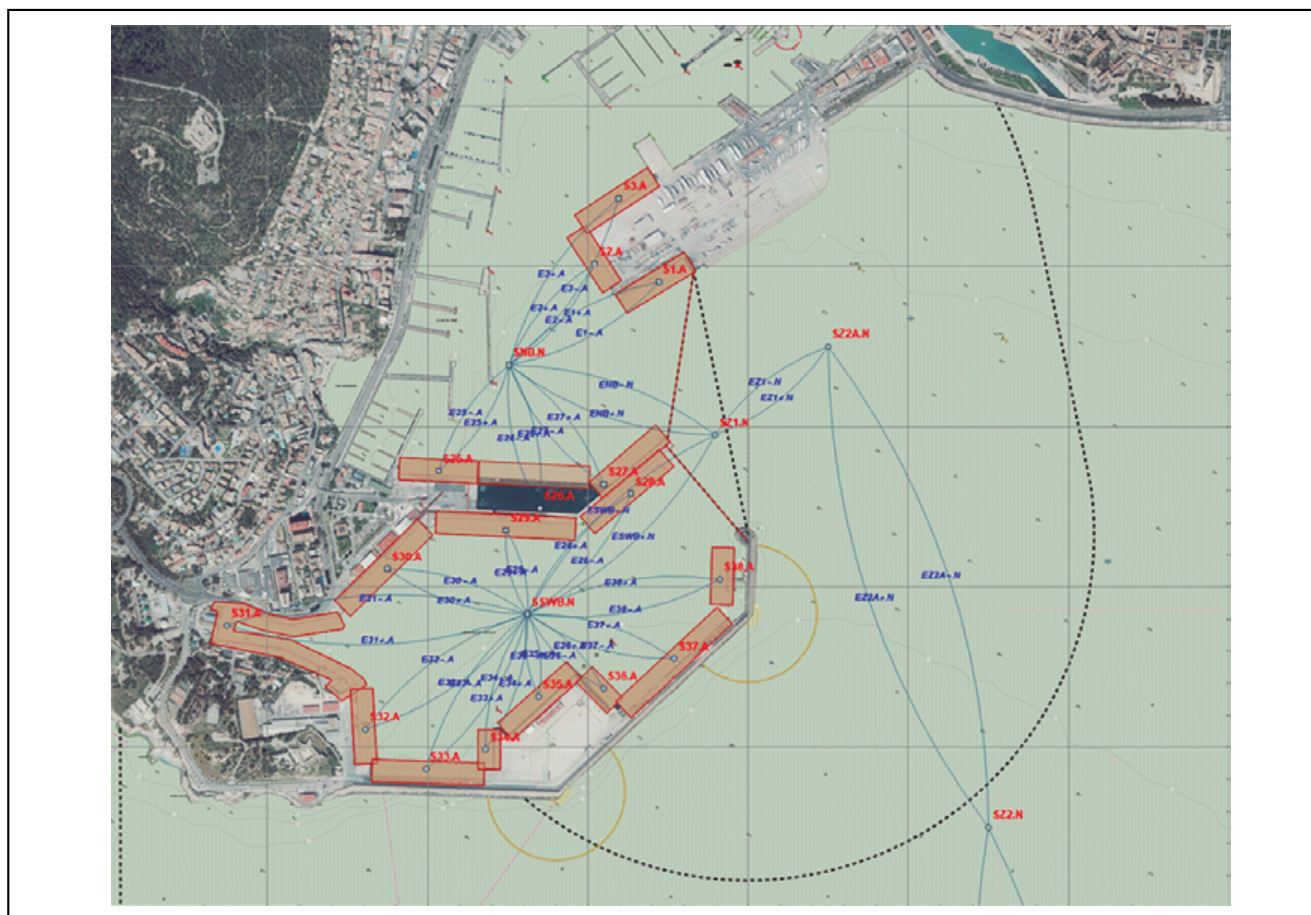
### 2.2.3. Geometría asociada a estados y eventos

Para el empleo práctico del grafo en el estudio del tráfico marítimo, es necesario asignar una geometría concreta a cada uno de sus elementos, de forma que pueda

descomponerse cada estancia de un barco en una secuencia de estados en el grafo. De acuerdo con sus definiciones, los estados se corresponden con regiones poligonales mientras los eventos quedan identificados con las fronteras (líneas o polilíneas) que los separan. Luego para cada evento se define una polilínea o polígono cuya intersección con la trayectoria del buque desencadena el evento y consecuentemente el cambio de estado. Las geometrías se definen en un sentido antihorario, de forma que el producto vectorial positivo con la trayectoria implica un evento de tipo positivo (entrada) y negativo (de salida) en caso contrario, permitiendo generar la secuencia de estados asociada a la estancia mediante el procesamiento de los segmentos elementales de la trayectoria del barco junto con las geometrías de los eventos.

La figura 3 muestra una representación geométrica del grafo, incluyendo en este caso una zona adicional de antepuerto (o antedársena, si se prefiere, dado que se trata de aguas -zona II- del puerto), y con la posición de los estados establecida de acuerdo con la geometría del puerto.

Los eventos asociados a la entrada/salida en los diferentes muelles son definidos como una poligonal a partir de una línea base formada por el cantil del muelle –o alineación del pantalán en su caso–, que se traslada en la dirección perpendicular 20 m hacia tierra y 50 m en el lado del mar, configurando generalmente un rectángulo. Estas dimensiones tienen por objeto acomodar, con un margen razonable de error, las posiciones de cada barco que se encuentre atracado; por ejemplo, en el caso de un barco de 30 m de manga, su centro distará aproximadamente 15 m del



**Figura 3.** Representación geométrica del grafo del puerto sobre carta náutica p.5, IHM y orto imagen PNOA con polígonos de atraque y límites de zonas navegables.

**Tabla 3.** Catálogo de pares de eventos asociados a cada estado

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S0.N   | {{EZ2-N, EZ2+N}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S22.N  | {{EZ2+N, EZ2-N}, {EZ2+N, EZ1+N}, {EZ1-N, EZ2-N}, {EZ1-N, EZ1+N}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S21.N  | {{EZ1+N, EZ1-N}, {EZ1+N, ENB+N}, {EZ1+N, ESWB+N}, {ENB-N, EZ1-N}, {ENB-N, ENB+N}, {ENB-N, ESWB+N}, {ESWB-N, EZ1-N}, {ESWB-N, ENB+N}, {ESWB-N, ESWB+N}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| SNB.N  | {{ENB+N, ENB-N}, {ENB+N, E1+A}, {ENB+N, E2+A}, {ENB+N, E3+A}, {ENB+N, E25+A}, {ENB+N, E26+A}, {ENB+N, E27+A}, {E1-A, ENB-N}, {E1-A, E1+A}, {E1-A, E2+A}, {E1-A, E3+A}, {E1-A, E25+A}, {E1-A, E26+A}, {E1-A, E27+A}, {E2-A, ENB-N}, {E2-A, E1+A}, {E2-A, E2+A}, {E2-A, E3+A}, {E2-A, E25+A}, {E2-A, E26+A}, {E2-A, E27+A}, {E3-A, ENB-N}, {E3-A, E1+A}, {E3-A, E2+A}, {E3-A, E3+A}, {E3-A, E25+A}, {E3-A, E26+A}, {E3-A, E27+A}, {E25-A, ENB-N}, {E25-A, E1+A}, {E25-A, E2+A}, {E25-A, E3+A}, {E25-A, E25+A}, {E25-A, E26+A}, {E25-A, E27+A}, {E26-A, ENB-N}, {E26-A, E1+A}, {E26-A, E2+A}, {E26-A, E3+A}, {E26-A, E25+A}, {E26-A, E26+A}, {E26-A, E27+A}, {E27-A, ENB-N}, {E27-A, E1+A}, {E27-A, E2+A}, {E27-A, E3+A}, {E27-A, E25+A}, {E27-A, E26+A}, {E27-A, E27+A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| S1.A   | {{E1+A, E1-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| S2.A   | {{E2+A, E2-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| S3.A   | {{E3+A, E3-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| S25.A  | {{E25+A, E25-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S26.A  | {{E26+A, E26-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S27.A  | {{E27+A, E27-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| SSWB.N | {{ESWB+N, ESWB-N}, {ESWB+N, E28+A}, {ESWB+N, E29+A}, {ESWB+N, E30+A}, {ESWB+N, E31+A}, {ESWB+N, E32+A}, {ESWB+N, E33+A}, {ESWB+N, E34+A}, {ESWB+N, E35+A}, {ESWB+N, E36+A}, {ESWB+N, E37+A}, {ESWB+N, E38+A}, {E28-A, ESWB-N}, {E28-A, E29+A}, {E28-A, E30+A}, {E28-A, E31+A}, {E28-A, E32+A}, {E28-A, E33+A}, {E28-A, E34+A}, {E28-A, E35+A}, {E28-A, E36+A}, {E28-A, E37+A}, {E28-A, E38+A}, {E29-A, ESWB-N}, {E29-A, E28+A}, {E29-A, E29+A}, {E29-A, E30+A}, {E29-A, E31+A}, {E29-A, E32+A}, {E29-A, E33+A}, {E29-A, E34+A}, {E29-A, E35+A}, {E29-A, E36+A}, {E29-A, E37+A}, {E29-A, E38+A}, {E30-A, ESWB-N}, {E30-A, E28+A}, {E30-A, E29+A}, {E30-A, E30+A}, {E30-A, E31+A}, {E30-A, E32+A}, {E30-A, E33+A}, {E30-A, E34+A}, {E30-A, E35+A}, {E30-A, E36+A}, {E30-A, E37+A}, {E30-A, E38+A}, {E31-A, ESWB-N}, {E31-A, E28+A}, {E31-A, E29+A}, {E31-A, E30+A}, {E31-A, E31+A}, {E31-A, E32+A}, {E31-A, E33+A}, {E31-A, E34+A}, {E31-A, E35+A}, {E31-A, E36+A}, {E31-A, E37+A}, {E31-A, E38+A}, {E32-A, ESWB-N}, {E32-A, E28+A}, {E32-A, E29+A}, {E32-A, E30+A}, {E32-A, E31+A}, {E32-A, E32+A}, {E32-A, E33+A}, {E32-A, E34+A}, {E32-A, E35+A}, {E32-A, E36+A}, {E32-A, E37+A}, {E32-A, E38+A}, {E33-A, ESWB-N}, {E33-A, E28+A}, {E33-A, E29+A}, {E33-A, E30+A}, {E33-A, E31+A}, {E33-A, E32+A}, {E33-A, E33+A}, {E33-A, E34+A}, {E33-A, E35+A}, {E33-A, E36+A}, {E33-A, E37+A}, {E33-A, E38+A}, {E34-A, ESWB-N}, {E34-A, E28+A}, {E34-A, E29+A}, {E34-A, E30+A}, {E34-A, E31+A}, {E34-A, E32+A}, {E34-A, E33+A}, {E34-A, E34+A}, {E34-A, E35+A}, {E34-A, E36+A}, {E34-A, E37+A}, {E34-A, E38+A}, {E35-A, ESWB-N}, {E35-A, E28+A}, {E35-A, E29+A}, {E35-A, E30+A}, {E35-A, E31+A}, {E35-A, E32+A}, {E35-A, E33+A}, {E35-A, E34+A}, {E35-A, E35+A}, {E35-A, E36+A}, {E35-A, E37+A}, {E36-A, ESWB-N}, {E36-A, E28+A}, {E36-A, E29+A}, {E36-A, E30+A}, {E36-A, E31+A}, {E36-A, E32+A}, {E36-A, E33+A}, {E36-A, E34+A}, {E36-A, E35+A}, {E36-A, E36+A}, {E36-A, E37+A}, {E36-A, E38+A}, {E37-A, ESWB-N}, {E37-A, E28+A}, {E37-A, E29+A}, {E37-A, E30+A}, {E37-A, E31+A}, {E37-A, E32+A}, {E37-A, E33+A}, {E37-A, E34+A}, {E37-A, E35+A}, {E37-A, E36+A}, {E37-A, E37+A}, {E37-A, E38+A}, {E38-A, ESWB-N}, {E38-A, E28+A}, {E38-A, E29+A}, {E38-A, E30+A}, {E38-A, E31+A}, {E38-A, E32+A}, {E38-A, E33+A}, {E38-A, E34+A}, {E38-A, E35+A}, {E38-A, E36+A}, {E38-A, E37+A}, {E38-A, E38+A}} |
| S28.A  | {{E28+A, E28-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S29.A  | {{E29+A, E29-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S30.A  | {{E30+A, E30-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S31.A  | {{E31+A, E31-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S32.A  | {{E32+A, E32-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S33.A  | {{E33+A, E33-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S34.A  | {{E34+A, E34-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S35.A  | {{E35+A, E35-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S36.A  | {{E36+A, E36-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S37.A  | {{E37+A, E37-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| S38.A  | {{E38+A, E38-A}}                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

muelle, permitiendo un margen de error de la posición reportada (generalmente mediante GPS) de 35 m en la dirección perpendicular al muelle antes de que se produzca un cambio de estado.

### 2.2.4. Empleo práctico del grafo para el estudio del tráfico

El empleo del grafo conjuntamente con la información de las trayectorias de los barcos permite obtener una caracterización simple de las estancias de los barcos y, mediante agregación, del tráfico portuario.

Estos análisis de tráfico pueden realizarse ya sea a partir de la información de trayectorias de buques contenidas en mensajes AIS o bien, en situaciones de diseño, mediante las trayectorias registradas en ejercicios de simulación de maniobras de buques. En ambos casos, es posible disponer de series temporales de alta frecuencia de la posición, velocidad y rumbo de los buques durante su evolución en las aguas portuarias. Los segmentos asociados a cada par de posiciones sucesivas, generalmente con un intervalo temporal de algunos segundos, pueden evaluarse con los diferentes segmentos que definen los eventos del grafo, configurando finalmente el conjunto de eventos que definen una estancia completa de un barco en puerto. La estancia queda definida, por tanto, por una secuencia de estados con instantes de inicio y final definidos o, alternativamente, por una secuencia de eventos en instantes definidos.

Para asegurar la corrección de la estancia, es conveniente disponer de un “catálogo” de pares de eventos asociados a cada estado, es decir, secuencias de eventos que deben necesariamente preceder/suceder a cada estado.

Incluso en el caso de un grafo relativamente pequeño, el número de posibles combinaciones puede ser grande. La tabla 3 recoge los pares aceptables, es decir, cada estado en el lado izquierdo de la tabla debe situarse en el recorrido del grafo entre uno de los pares ordenados de eventos del lado derecho de la tabla. La utilidad de esta tabla es la comprobación de la corrección de las secuencias de estados observadas para cada barco como resultado del proceso de sus trayectorias definidas mediante los datos AIS con los eventos. Si un estado no se encuentra rodeado por una de las secuencias de eventos definidos como asociados en la tabla 3, entonces la secuencia es incorrecta, posiblemente como consecuencia de una pérdida de datos.

Si se elige el detalle del grafo de forma que capte los diferentes estados significativos durante la navegación en el puerto, el registro de la estancia como sucesión de estados/eventos puede representar una compresión de los datos de dos órdenes de magnitud respecto al registro original de la trayectoria, facilitando el análisis agrupado y permaneciendo además el detalle de cada estancia fácilmente recuperable a partir de los datos asociados al grafo.

## 3. APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LAS OPERACIONES MARÍTIMAS EN EL PUERTO DE PALMA

La esquematización del puerto definida en el apartado anterior ha sido empleada, junto con la información de estancias y datos AIS (facilitados por la Autoridad Portuaria y SASEMAR respectivamente), para estudios analíticos (Grassa *et al.* 2019) para obtener un conjunto de características generales del tráfico en el puerto y evaluar

estadísticamente los tiempos de ejecución de las operaciones en función del tipo de buque y muelle de destino. Los apartados a continuación describen muy brevemente ambos aspectos.

### 3.1. Características generales del tráfico

La información de estadías facilitada por la Autoridad Portuaria para el periodo 2014-2018 se ha analizado generándose diversos resultados agregados entre los que se destacan los siguientes:

- Tipos de tráficos: estancias por tipo de buque
- Empleo de los muelles: uso por tipo de barco, variación estacional
- Características de buques: distribución de esloras por clase
- Duración de las estancias por tipo de buque, demoras en entradas/salidas, intensidad diaria de acceso, máxima intensidad horaria, ocupación de atraques
- Distribución del tráfico por dársenas

Un aspecto destacable del tráfico es la preponderancia de los ferris de carga/pasaje, más de la mitad del tráfico total en el puerto, seguidos de los cruceros turísticos y los ferris de pasaje y coches; estas tres categorías representan del orden del 90 % de las estancias. El tráfico presenta una fuerte estacionalidad, con un incremento en el número de estadías del 50 % en los meses de verano respecto al mínimo en invierno, véase la figura 4. Una parte considerable de esta estacionalidad está vinculada a la temporada de cruceros turísticos.

El tráfico tiene una notable variabilidad diaria, llegando a alcanzar valores máximos de 17 entradas al día con valores frecuentes de 12 y mínimos de 8 barcos/día. Por su parte, la duración de las estancias de los ferris de carga/pasaje son muy reducidas, apenas 5 horas como duración media, siendo de 10 horas la media de la estancia de los cruceros turísticos. Una característica especial es que el tipo de tráfico más numeroso, los ferris de carga/pasaje, realizan sus operaciones en un rango horario muy limitado debido a las necesidades de las cadenas de suministro a las que sirven. Como resultado de esta concentración, las intensidades horarias de operaciones de acceso a puerto

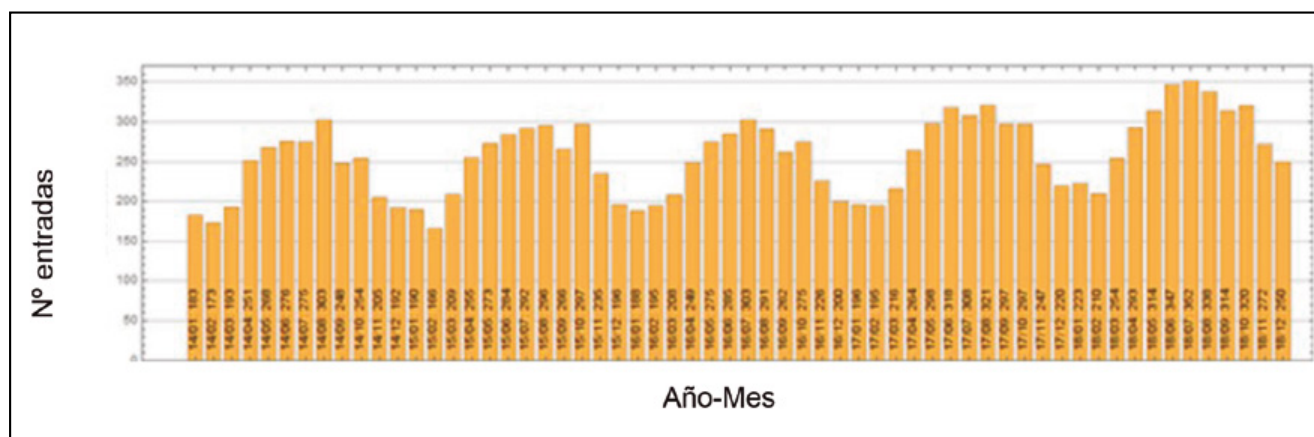


Figura 4. Número mensual de estancias de barcos, 2014–2018.

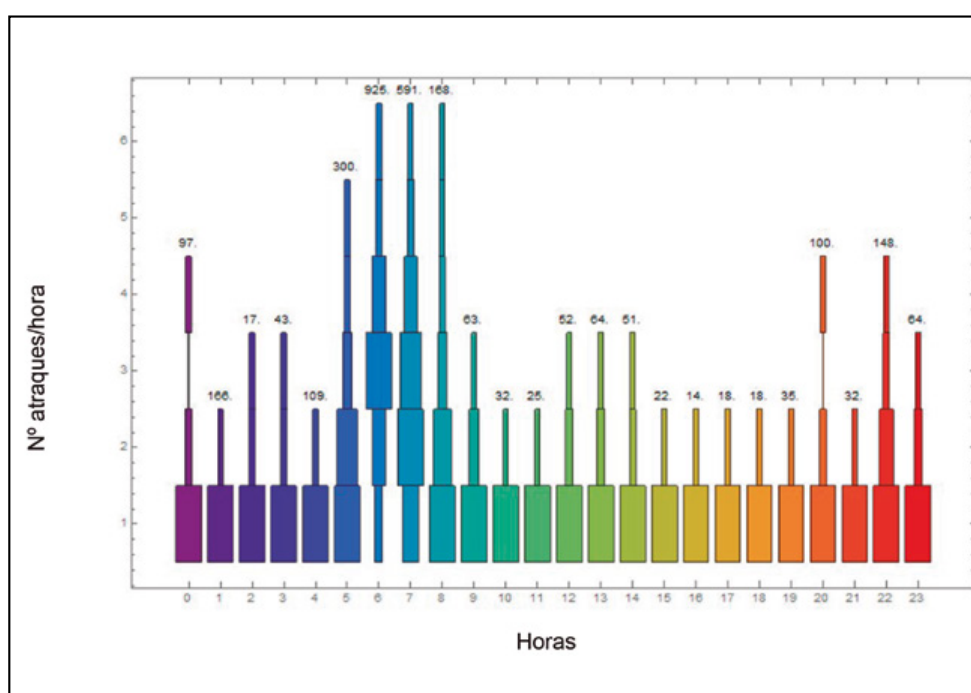


Figura 5. Intensidad horaria de atraques en el puerto de Palma.

tienen valores muy elevados, llegando a alcanzar valores modales medios (véase la figura 5) de tres barcos/hora en el entorno de las 6 de la mañana.

Estas intensidades tan elevadas en horarios determinados pueden resultar un factor limitativo de la capacidad del puerto (al menos para dar respuesta a la demanda requerida por la cadena logística de aprovisionamiento de la isla), pese a contar con una dotación adecuada de muelles. Y las posibilidades de mantener tasas de intensidad elevadas deben ser analizadas estudiando los tiempos requeridos por las maniobras de acceso y salida.

3.2. Evaluación estadística de las operaciones

Como situación de referencia se ha realizado una evaluación estadística de los tiempos de operaciones en las antedársenas y dársenas y, por consiguiente, de ocupación de estas zonas asociadas a diferentes tipos de buques (7 categorías) y muelles de destino en la situación actual del puerto.

El análisis para cada una de las operaciones de acceso y salida se ha realizado reconstruyendo, a partir de los sucesivos mensajes AIS de posición, las trayectorias y tiempos de entrada de cada barco, derivando de las mismas los instantes correspondientes a los eventos de cambio de estado y, a partir de ellos, deduciendo las duraciones en cada uno de los estados de interés. La ejecución se realiza evaluando los cortes de cada segmento de la trayectoria correspondiente al punto medio del barco con el segmento o segmentos que definen los eventos en el grafo (por ejemplo, el polígono que representa un muelle) y su sentido de entrada o salida. La secuencia correspondiente a cada estadía en aguas portuarias se comprueba con el catálogo del grafo, y se investigan para su posible corrección o rechazo de las secuencias anómalas que no cumplen completamente las reglas de evolución sucesiva posibles.

Para ello, se ha empleado la base de datos de mensajes AIS ya descrita (Grassa *et al.* 2019), basada en el flujo de datos facilitado por SASEMAR al CEDEX. Se han seleccionado, para el año 2018, los mensajes de posición y estáticos/de viaje contenidos en la zona inmediata al puerto de Palma y se han reconstruido, para cada barco, las trayectorias asociadas a cada una de sus estancias en el puerto.

A modo de ejemplo, se ilustra en la figura 6 las maniobras de acceso de un ferri y de un crucero al muelle de Paraires, junto con tablas de distribución de sus tiempos de operación en la antedársena y dársena.

Por su parte, la figura 7 muestra operaciones de acceso –de ejemplo– en la primera y segunda alineación del dique SW, junto con los respectivos tiempos estadísticos de operación para ferris medianos con eslora próxima a 200 m, el barco más frecuente en el puerto.

En una situación de proyecto es posible generar datos de partida para la simulación de operaciones empleando una idéntica metodología sobre un grafo adaptado junto con datos de maniobras simuladas de buques realizadas en condiciones apropiadas, la figura 8 ilustra operaciones de acceso de ferris a un pantalán de la dársena SW del puerto de Palma en una situación de proyecto considerada por la Autoridad Portuaria.

De igual forma a lo indicado para la caracterización estadística de los tiempos de acceso empleando datos AIS, para situaciones de proyecto pueden utilizarse repeticiones múltiples de operaciones que permitan establecer una base estadística en las simulaciones de tráfico. La figura 9 muestra mediante una escala de colores, la frecuencia de ocupación de zonas navegables en 8 repeticiones de la operación de acceso a un muelle por parte de un ferri de eslora aproximada 200 m y los histogramas correspondientes a los tiempos de ocupación de la antedársena y dársena.

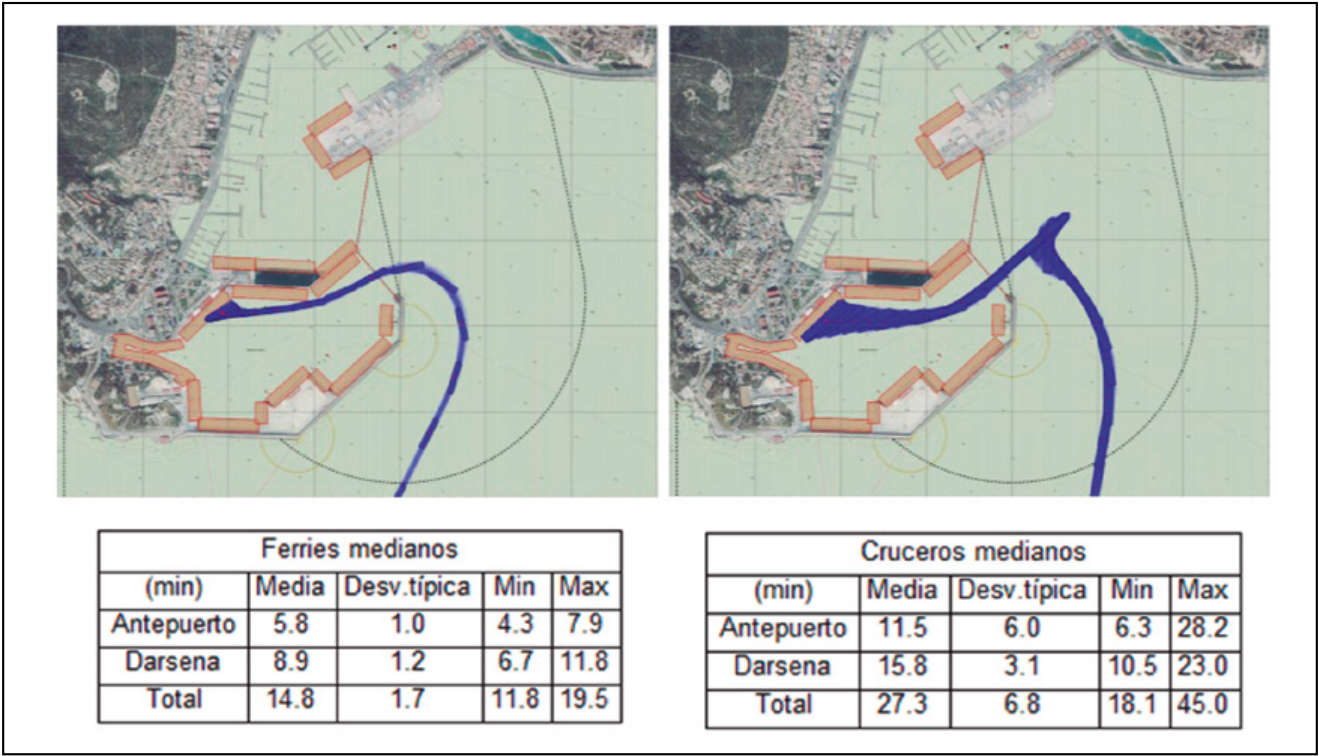
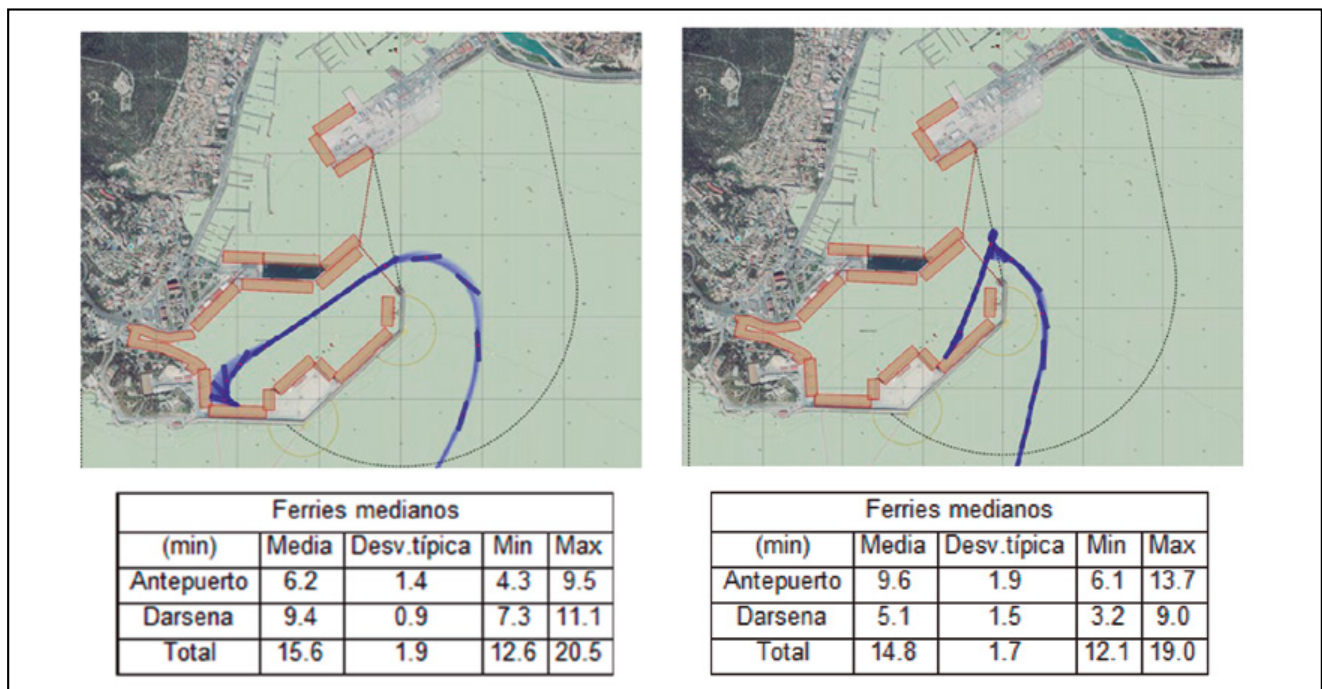
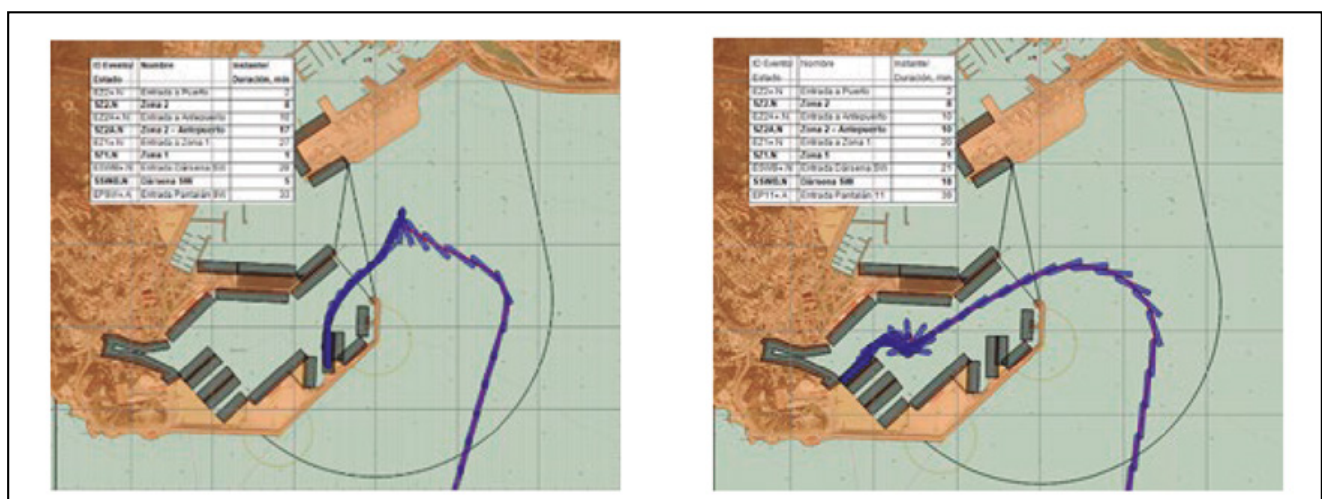


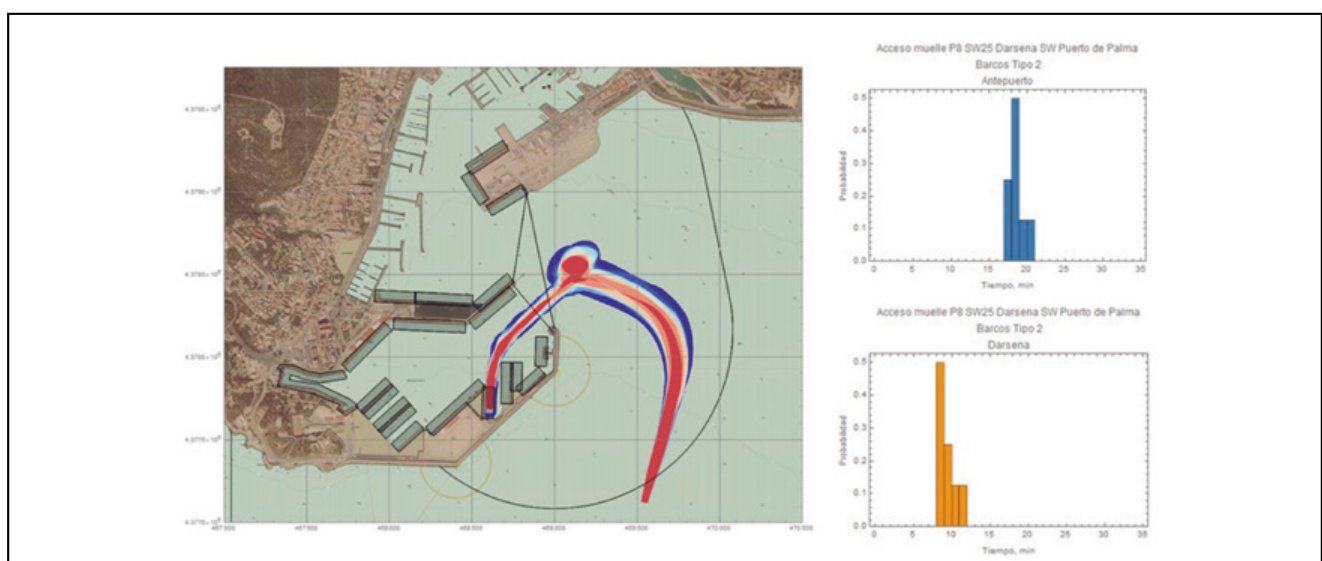
Figura 6. Maniobras de acceso de un ferri de 199 m de eslora y de un crucero de 333 m, al muelle de Paraires y tiempos estadísticos de operación.



**Figura 7.** Maniobras de acceso de un ferri de 190 m de eslora a los muelles de la 1ª y 2ª alineación del dique SW y tiempos estadísticos de operación.



**Figura 8.** Maniobras simuladas de acceso de un ferri a distintos pantalanes en una alternativa de disposición de la dársena SW del puerto de Palma.



**Figura 9.** Frecuencia de ocupación de zonas en 8 maniobras de acceso a un muelle por un ferri de eslora 200 m y tiempos de operación en el antepuerto y en la dársena.

#### 4. SIMULACIÓN DE TRÁFICO MARÍTIMO

Disponiendo de un marco lógico para la descripción de las operaciones marítimas y una base estadística para la asignación de tiempos de maniobra, se ha desarrollado un simulador discreto de eventos que permite evaluar el tráfico y proponer, en su caso, posibles programaciones en las operaciones que eviten situaciones de congestión en los accesos.

El simulador empleado es del tipo Simulador de Eventos Discretos (SED), en el que el comportamiento de un sistema se asimila al de una máquina de estados (por ejemplo, en un puerto cada estado puede ser una de entre el conjunto de las situaciones posibles de ocupación de sus muelles y de navegación en sus áreas de aproximación y dársenas), y se define un conjunto de posibles transiciones (eventos) a lo largo del tiempo entre estos estados sujetas a unas reglas de funcionamiento, las simulaciones consisten en el registro en el tiempo de los eventos ejecutados, de acuerdo con las reglas del sistema en respuesta a sucesos determinados como pudiera ser la llegada de un barco. Los resultados pueden ser analizados de forma determinista o estadísticamente para evaluar el comportamiento del sistema.

La categoría complementaria a los SED es la de los simuladores continuos, que se emplean para describir un sistema que cambia de forma continua en el tiempo, y se modelizan generalmente mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de evolución en el tiempo derivadas, por ejemplo, de la física de los fenómenos o procesos. El simulador de maniobra de buques del CEDEX es un caso típico de este otro tipo de sistemas.

Los elementos fundamentales de un SED son los siguientes:

- El sistema que se simula, definido mediante un conjunto de componentes cada una de ellas susceptible de encontrarse en estados diferentes, como un muelle ocupado o vacío, una dársena con un barco maniobrando o no.
- Las reglas de funcionamiento del sistema indican sus respuestas posibles frente a diferentes sucesos entre ellos: el cambio del estado de un muelle de desocupado a estar ocupado cuando atracar un barco. Las reglas definen qué cambios de estado pueden producirse (simularse) en el sistema y cuándo pueden producirse; por ejemplo, un barco puede atracar en un muelle, pero si actualmente está ocupado solo podrá acceder a él cuando quede libre.
- Un conjunto de sucesos externos (datos de entrada) que suceden a lo largo del tiempo y activan cambios de estado en el sistema. Así se encontraría la relación de barcos que llegan a puerto con su hora de llegada y conjunto de características.

Otro elemento característico de una simulación es el avance del tiempo a lo largo del proceso de la simulación. El tiempo puede hacerse avanzar mediante incrementos pequeños de tiempo en la simulación, observando y anotando en su caso los cambios que se producen (simulación síncrona). De nuevo, el simulador de maniobras de buques es un ejemplo de este tipo, en el que el rumbo, la velocidad

y la posición del barco se van modificando de forma casi continua mediante la solución de las ecuaciones del movimiento para un intervalo de tiempo, a partir de una situación inicial.

En el caso de un simulador SED, tan sólo tienen interés los momentos correspondientes a los sucesos que generan cambios en el estado del sistema y, por tanto, la simulación avanza en el tiempo a saltos, de suceso en suceso. Dado un suceso, se anota el cambio de estado que implica y, de acuerdo con las reglas del sistema, se avanza en el tiempo hasta el instante correspondiente al siguiente suceso, ya sea desencadenado por la finalización de alguno de los estados en el propio sistema o por la ocurrencia de un suceso con origen externo.

Hay un cierto número de aplicaciones, de código abierto y comerciales, disponibles para la implementación de simuladores SED, tanto de carácter general como especializados en segmentos concretos. Estos entornos disponen generalmente de aplicaciones para post-proceso de los resultados de las simulaciones. En este caso se ha optado por desarrollar una aplicación sencilla *ad hoc* en vez de emplear un sistema de simulación.

Los elementos implicados en el SED pueden relacionarse directamente con la descripción lógica del puerto mediante un grafo, definida y utilizada ya en los anteriores apartados. En este trabajo ese modelo se emplea conceptualmente en el diseño del simulador.

##### 4.1. Especificaciones del simulador de tráfico marítimo de acceso a puerto

El modelo desarrollado para la dársena SW es de carácter elemental, y se centra en el estudio de las operaciones diarias de acceso por parte de barcos comerciales. Su objetivo es permitir la propuesta de secuencias de llegada, que eviten la generación de esperas y su eventual acumulación durante la ventana de tiempo diaria de mayor tasa de llegadas.

El primer componente del modelo es el de los datos de entrada. Para la simulación de los accesos un día determinado, el simulador utiliza una relación de las llegadas en el día, cada una de ellas incluyendo la siguiente información: hora de llegada, tipo de barco y eslora. Estos datos pueden ser definidos bien a partir de datos reales actuales de llegadas (según se detallará más adelante), representativos de la intensidad actual del tráfico y de su secuencia temporal, o bien generados artificialmente para representar niveles diferentes de tráfico y/o de su composición por tipos de buques y/o sus diferentes intervalos de presentación.

El análisis diario incluye la obtención de las siguientes características principales:

- Periodos de inactividad en el acceso, es decir, periodos de “semáforo verde” previo a la llegada del barco en los que se podrían ejecutar libremente operaciones de acceso.
- Tiempos de espera “semáforo rojo” a los que se puedan ver sometidos barcos que desean acceder debido a la concurrencia de otras operaciones incompatibles de acuerdo con las reglas establecidas para el sistema.

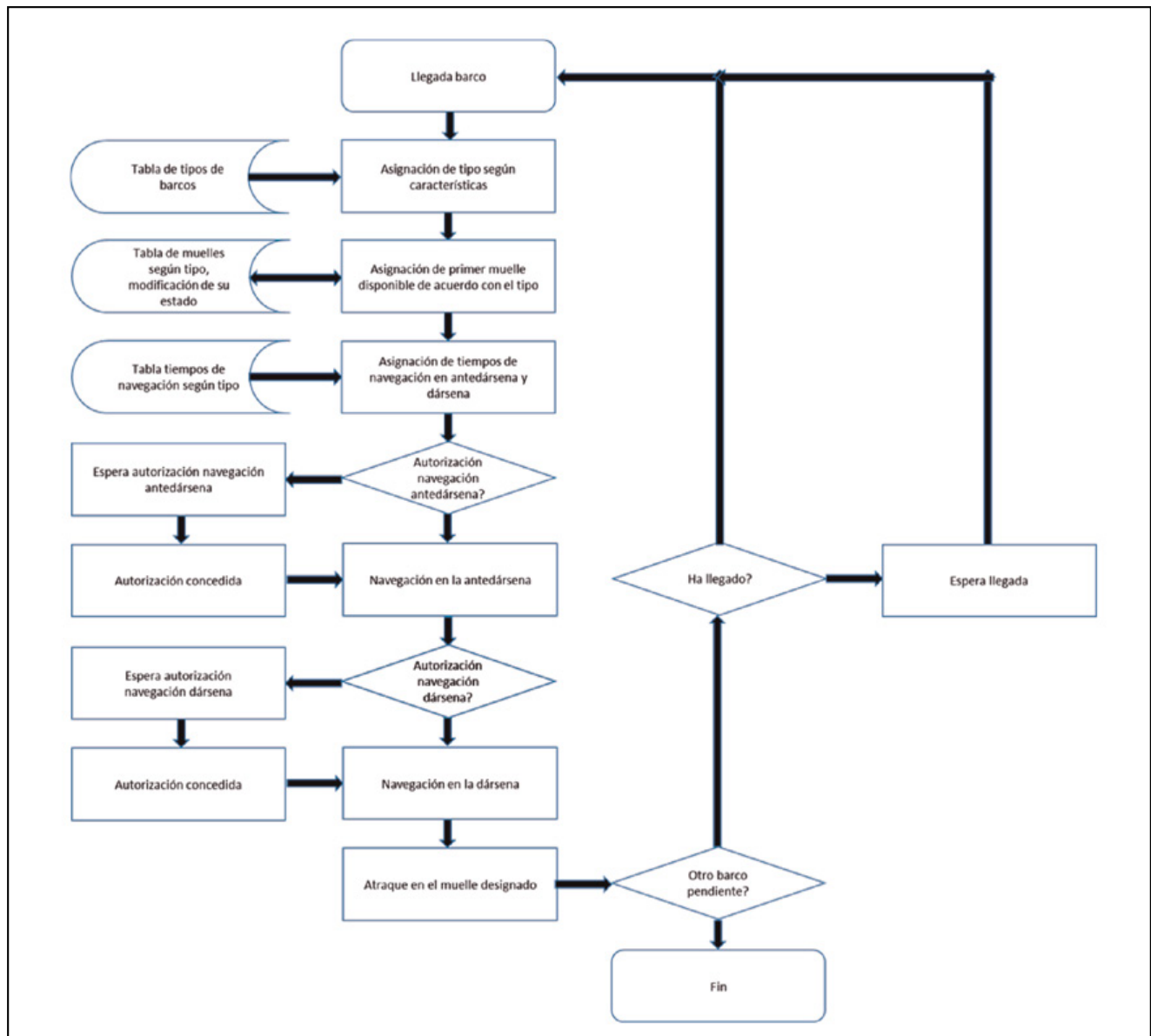
Los elementos del sistema que se modeliza son los destinos del tráfico: los diferentes muelles eventualmente

utilizables, con dos posibles estados: ocupados o vacíos, así como las zonas de paso obligado en la aproximación: la antedársena y dársena según los casos, también con dos estados posibles: ocupadas por un barco navegando de entrada o no ocupadas.

Una característica de los estados de navegación en la antedársena y dársena es que estos estados son actividades sujetas a reglas que condicionan su posible inicio, y tienen una duración definida, cuya finalización implica un nuevo suceso inmediato o a iniciar en el futuro de acuerdo con las especificaciones. Las duraciones de la navegación en la antedársena y dársena son datos incorporados en la definición del simulador, dependientes del tipo de barco y con una definición determinista o estadística, derivadas, o bien de la caracterización empleando datos AIS de maniobras reales, o como resultado de maniobras simuladas para situaciones de diseño.

En este trabajo, y por simplicidad, el análisis se ha centrado en los accesos tomando como hipótesis que las salidas no implican limitación práctica, dentro de límites razonables, para la planificación de los accesos, en particular en las horas de mayor interés, por su intensidad de tráfico de entrada.

La figura 10 presenta un diagrama esquemático del flujo de las operaciones del simulador para una situación como la indicada en el puerto de Palma. El ciclo se inicia con la llegada de un barco, al que de acuerdo con sus características se le asigna una clase – tipo. El siguiente paso es la asignación del primer muelle que esté disponible y que sea apto para ese tipo de barco, de acuerdo con una tabla de características de los muelles y de su estado (ocupado o vacío), estas situaciones pueden incorporarse como propiedades adicionales en la definición de los vértices del grafo. El siguiente paso es esperar a disponer de autorización para navegar en la antedársena y, cuando corresponda, en la dársena, todo ello de acuerdo con las reglas de navegación que se establezcan y empleando los tiempos de maniobra correspondientes, ya sean deterministas o asignados de acuerdo a una distribución de probabilidad. Finalmente el barco atraca en el muelle designado, que queda de esta forma ocupado. Corresponde entonces ver si hay barcos con llegada posterior para procesarlos o bien finalizar el proceso y entregar los resultados, que consisten en la historia de la evolución/espera de cada barco desde su llegada hasta el momento de atraque. Un aspecto de interés para los objetivos de este estudio es



**Figura 10.** Elementos principales y diagrama de flujo de la simulación de accesos.

que no sólo se obtienen los tiempos de, en su caso, espera de entrada a la antedársena y dársena, sino también los tiempos de “semáforo verde” previos a la llegada de cada barco al inicio de una evolución, esto es, cuánto tiempo antes de su llegada el barco podría haber iniciado su evolución ya sea en la antedársena o en la dársena.

#### 4.2. Parámetros, modos de operación y datos de entrada

El simulador descrito en el apartado anterior se alimenta de conjuntos diarios de llegadas de barcos a los que se debe asignar un tipo determinado, de cara a posibilitar la asignación del correspondiente atraque. Las series de llegadas pueden ser completamente simuladas definiendo una determinada programación (determinista o no) de operaciones de líneas regulares, o bien, basarse en series reales de llegadas a puerto para generar series representativas de los tráficos actuales o extendidos para representar intensidades de tráfico futuras.

Cada barco simulado debe identificarse con un conjunto de características que permitan su clasificación dentro de los tipos definidos a efectos de la asignación de un muelle compatible y de los tiempos de operación característicos de ese tipo. En el caso del puerto de Palma se ha considerado un total de 9 grupos, que recogen los más representativos del funcionamiento cotidiano del puerto: ferris carga/pasaje, ferris pasaje/coches, remolcadores, convencionales, pasaje rápido, cruceiros turísticos, *roll-on/roll-off* de carga rodada, *roll-on/roll-off* de coches, graneleros-cementeros y tanques petroleros.

Una vez definidos los tipos de buques es necesario proceder sucesivamente a la asignación de muelle, una tarea que requiere consideración detallada conforme a determinados objetivos de explotación por parte del puerto. En este modelo se ha definido, para cada tipo de buque, una serie de muelles compatibles, y como regla de asignación simple se establece la ocupación del primer muelle compatible no ocupado.

Los elementos más significativos de la operativa de asignación son los siguientes:

- Se inicia cada día con todos los muelles libres.
- No se distingue a efectos de asignación de atraque entre tráficos regulares y otros.
- No se preasignan muelles a barcos específicos.
- Los barcos se atienden en estricto orden de llegada, FCFS (*First-Come, First-Served*).
- La asignación de atraque se realiza utilizando el primer muelle de la lista compatible con el tipo de barco y que aún está libre (deja de estarlo en el momento de su asignación).
- Dentro de cada día, los muelles no se reutilizan.

Algunas de estas características son indudables simplificaciones que se han tomado en el desarrollo inicial y se estima pueden ser aceptables en algunas situaciones de estudio, no siendo, por otra parte, de especial dificultad su adaptación a otras situaciones.

Junto con la asignación de muelle de destino, es necesario definir, para cada par muelle – tipo de buque, sus tiempos de evolución en la antedársena y en la dársena, caracterizados por un valor medio como estimación determinista y una desviación típica indicativa de la dispersión de resultados, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 3,

tanto en situaciones de empleo de datos AIS como de resultados de simulación.

Otro aspecto requerido para el funcionamiento del simulador de acuerdo con la estructura descrita es la definición de unas reglas sobre las condiciones para la autorización del acceso de un barco al puerto de acuerdo con la especificación dada en el diagrama de la figura 10. Se han considerado hipotéticamente dos posibles modos de operación:

- Independencia de Operaciones (IO): se autoriza a un barco a efectuar sus maniobras de acceso en antedársena y dársena siempre que no haya ningún otro buque evolucionando en el puerto.
- Solape Parcial de Operaciones (SPO): se puede autorizar la ejecución simultánea de operaciones de entrada en la antedársena y en la dársena.

El modo IO implica otorgar exclusividad de uso de las zonas de antedársena y dársena a un barco y, por tanto, no se puede autorizar el inicio de maniobras por parte de otro barco hasta que el primero se encuentre atracado. Luego, un barco que arriba durante el periodo de evolución de otro debe esperar. El modo SPO implica, sin embargo, permitir que un barco comience a efectuar maniobras en la antedársena siempre que no haya ningún otro evolucionando en esa misma zona. Una vez finalizada esa etapa, puede a su vez proceder a entrar en la dársena siempre que no haya otro barco maniobrando para atracar en su interior, y a partir de su entrada en la dársena, un tercer barco podría de nuevo iniciar sus operaciones en la antedársena. Este modo SPO puede incrementar en alguna medida la intensidad horaria de atraques en el puerto. En contrapartida, requiere un control más intenso y complejo de las operaciones, y caso de que se considere su empleo, debe ser objeto de análisis desde el punto de vista de sus posibles riesgos y respuesta ante emergencias en general y para combinaciones particulares de secuencias de barcos.

Hecha esta salvedad, ambos esquemas han sido implementados en el simulador para el análisis de tráfico en diferentes situaciones de demanda. Sin afectar al resultado en términos de esperas totales, la implementación de la regla SPO se ha hecho de forma que el barco  $n + 1$  entra en la antedársena tan pronto como el barco  $n$  que estuviera operando en ella la abandona. En la realidad, ello se intentaría posiblemente ajustar de forma que el barco  $n + 1$  pueda evolucionar de forma continua de antedársena a dársena, y así la entrada sería inmediata sólo en el caso de que el tiempo esperado de evolución del barco  $n + 1$  en la antedársena sea mayor que el tiempo del  $n$  en la dársena.

#### 5. APLICACIÓN EN EL PUERTO DE PALMA

La aplicación de la metodología establecida en el apartado anterior, donde se describe el simulador de eventos discretos, comprende varias etapas, con el fin de que cada una de ellas pueda mejorar la alternativa anterior, o en el caso de que esto no sea posible, proporcione opciones de combinaciones posibles de alternativas, como se verá más adelante.

Una primera etapa comprende una aplicación sencilla del simulador a la serie de llegadas de buques en un día determinado, dentro del periodo de estudio, 1/7/2014-30/9/2018. Generalmente se escogieron días que durante el

desarrollo del estudio plantearon algún problema, ya fuese por una gran intensidad de tráfico de cruceros, coincidencia en la franja horaria de ferris o ambas situaciones.

Si bien es cierto que el análisis de uno o varios días con cierta intensidad de tráfico, no es en sí mismo concluyente, para determinar soluciones a los conflictos de operatividad que pudieran surgir, permite realizar un análisis preliminar, del que pueden extraerse resultados de interés para la aplicación de posteriores pautas de operación.

Una vez disponible la serie de llegadas de buques, correspondientes a un día, el simulador utiliza conjuntamente las tablas de asignación de muelles posibles y las tablas de valores de tiempos de evolución en antedársena y dársena para la configuración B1, descritas en el apartado anterior.

Según los criterios definidos para cada uno de los tipos de buques, a continuación el simulador procede a realizar una asignación automática al primer muelle libre

compatible, según orden de llegada. Cuando se llega a este punto entran en funcionamiento las restricciones impuestas a la navegación, pudiéndose elegir entre autorizar el inicio de la maniobra de aproximación de un buque, si no existe otro moviéndose en la antedársena o dársena, denominada como hemos visto Independencia de Operaciones (IO), o autorizar el comienzo de maniobra en la antedársena siempre que no exista otro buque operando en la misma y, sucesivamente, autorización de entrada en la dársena siempre que no haya otro buque evolucionando en su interior, navegación que se ha denominado Solape Parcial de Operaciones (SPO). La elección entre una u otra restricción se realiza previamente a la puesta en marcha del simulador.

Tras la asignación de muelle, eventual espera o esperas y navegación a través del puerto, la historia de las operaciones queda evaluada y reflejada en una tabla como la que se recoge a continuación:

**Tabla 4.** Operaciones de llegada de buques. Día 25 agosto de 2018. Regla IO

| Tipo                  | Tipo Estudio | Eslora | Cód. Muelle | Hora Actual de Atrake | AD Hora Llegada | Muelle B1 | AD Margen (+)/ Espera (-), min | AD Hora Entrada | AD Tiempo Maniobra | AD Hora Salida | D Margen (+) / Espera (-), min | D Hora Entrada | D Tiempo Maniobra | Hora Atrake |
|-----------------------|--------------|--------|-------------|-----------------------|-----------------|-----------|--------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| CRUCEROS TURISTICOS   | 7            | 300.00 | S35.A       | 04:40                 | 04:19           | S30.A     | 260.0                          | 04:19           | 16                 | 04:35          | 278.0                          | 04:35          | 26                | 05:01       |
| CRUCEROS TURISTICOS   | 7            | 283.90 | S30.A       | 05:39                 | 05:16           | S29.A     | 14.5                           | 05:16           | 16                 | 05:32          | 30.5                           | 05:32          | 13                | 05:45       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 186.40 | S34.A       | 06:09                 | 05:51           | SP11.A    | 6.9                            | 05:51           | 11.3               | 06:03          | 18.2                           | 06:03          | 16.4              | 06:19       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 188.30 | S33.A       | 06:24                 | 06:08           | SP12.A    | -11.2                          | 06:19           | 11.0               | 06:30          | 11.0                           | 06:30          | 16.0              | 06:46       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 198.99 | S1.A        | 06:40                 | 06:27           | SP13.A    | -19.0                          | 06:46           | 11.0               | 06:57          | 11.0                           | 06:57          | 17.0              | 07:14       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 199.10 | S3.A        | 06:50                 | 06:37           | SP14.A    | -37.1                          | 07:14           | 11.0               | 07:25          | 11.0                           | 07:25          | 18.0              | 07:43       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 190.50 | S37.A       | 07:49                 | 07:34           | SP15.A    | -9.3                           | 07:43           | 11.3               | 07:54          | 11.3                           | 07:54          | 18.9              | 08:13       |
| CRUCEROS TURISTICOS   | 6            | 325.45 | S28.A       | 12:26                 | 12:00           | S28.A     | 227.0                          | 12:00           | 21                 | 12:21          | 248.0                          | 12:21          | 10                | 12:31       |
| TANQUES PETROLEROS    | 8            | 182.14 | S38.A       | 18:03                 | 17:48           | S38.A     | 317.0                          | 17:48           | 13                 | 18:01          | 330.0                          | 18:01          | 9                 | 18:10       |
| PASAJE RAPIDOS        | 4            | 86.60  | S25.A       | 22:10                 | 21:58           | SP9E.A    | 228.0                          | 21:58           | 5                  | 22:03          | 233.0                          | 22:03          | 8                 | 22:11       |
| CRUCEROS TURISTICOS   | 7            | 283.90 | S29.A       | 22:44                 | 22:21           | S1.A      | 10.7                           | 22:21           | 16                 | 22:37          | 26.7                           | 22:37          | 11                | 22:48       |
| FERRY'S PASAJE/COCHES | 3            | 100.00 | S30.A       | 23:26                 | 23:14           | SP8.A     | 25.9                           | 23:14           | 23.6               | 23:38          | 49.5                           | 23:38          | 12.8              | 23:51       |

En primer lugar podemos observar una serie completa de llegadas, durante las 24 horas, en este caso correspondiente al día 25 de agosto de 2018. Las seis primeras columnas de la tabla se corresponden con datos previamente conocidos a la simulación, de izquierda a derecha: el nombre del buque, su tipo según la Autoridad Port de Balears, el tipo asignado por el simulador, su eslora, el código del muelle de atraque sobre la planta actual y la hora a la que se realiza el mismo proporcionada por el puerto. A partir de la séptima columna se presenta el historial de navegación sobre la nueva configuración: hora de llegada a la antedársena, muelle asignado bajo la alternativa B1, y tiempo de espera o margen para acceder a dicho muelle, hora de entrada a la antedársena, tiempo de maniobra y hora de salida de la misma, espera o margen para acceder a la dársena, hora de entrada a la misma, tiempo de la maniobra y, finalmente, hora de atraque en el muelle asignado.

Los tiempos de maniobra en la antedársena y en la dársena, así como los márgenes o esperas vienen expresados en minutos. El signo negativo para este valor indica en sí mismo un tiempo de espera que el buque ha de asumir, ya sea antes de iniciar maniobra en antedársena o dársena, mientras que un valor positivo de esta magnitud indica el tiempo que tiene que transcurrir hasta que el buque alcance esas posiciones y, por tanto, señala la posibilidad de aprovechar u optimizar el tiempo total disponible con ligeros cambios de horarios.

Este ejemplo muestra que para el día y regla de navegación seleccionados, para los ferris que llegan entre las 6 y las 7:34 horas de la mañana, se producen esperas de entre 9 y 37 minutos, haciéndose patente una posible congestión en esta franja horaria de la mañana que permite visualizar la necesidad de actuar sobre la misma. Si se elige la regla de navegación SPO, una tabla similar muestra la evolución obtenida:

**Tabla 5.** Operaciones de llegada de buques. Día 25 agosto de 2018. Regla SPO

| Tipo                  | Tipo Estudio | Eslora | Cód. Muelle | Hora Actual de Atrake | AD Hora Llegada | Muelle B1 | AD Margen (+)/ Espera (-), min | AD Hora Entrada | AD Tiempo Maniobra | AD Hora Salida | D Margen (+) / Espera (-), min | D Hora Entrada | D Tiempo Maniobra | Hora Atrake |
|-----------------------|--------------|--------|-------------|-----------------------|-----------------|-----------|--------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------------------------|----------------|-------------------|-------------|
| CRUCEROS TURISTICOS   | 7            | 300.00 | S35.A       | 04:40                 | 04:24           | S30.A     | 264.0                          | 04:24           | 16.8               | 04:41          | 281.0                          | 04:41          | 28.3              | 05:09       |
| CRUCEROS TURISTICOS   | 7            | 283.90 | S30.A       | 05:39                 | 05:17           | S29.A     | 36.2                           | 05:17           | 20.0               | 05:37          | 27.9                           | 05:37          | 15.9              | 05:53       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 186.40 | S34.A       | 06:09                 | 05:50           | SP11.A    | 13.6                           | 05:50           | 10.8               | 06:01          | 8.6                            | 06:01          | 17.7              | 06:19       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 188.30 | S33.A       | 06:24                 | 06:07           | SP12.A    | 6.2                            | 06:07           | 11.1               | 06:19          | -0.4                           | 06:19          | 16.5              | 06:35       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 198.99 | S1.A        | 06:40                 | 06:27           | SP13.A    | 8.9                            | 06:27           | 10.9               | 06:38          | 2.9                            | 06:38          | 14.7              | 06:53       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 199.10 | S3.A        | 06:50                 | 06:40           | SP14.A    | 1.7                            | 06:40           | 10.1               | 06:50          | -2.9                           | 06:53          | 17.0              | 07:10       |
| FERRY'S CARGA/PASAJE  | 2            | 190.50 | S37.A       | 07:49                 | 07:31           | SP15.A    | 40.5                           | 07:31           | 11.5               | 07:42          | 32.2                           | 07:42          | 17.5              | 08:00       |
| CRUCEROS TURISTICOS   | 6            | 325.45 | S28.A       | 12:26                 | 11:58           | S28.A     | 256.0                          | 11:58           | 13.8               | 12:12          | 252.0                          | 12:12          | 13.3              | 12:25       |
| TANQUES PETROLEROS    | 8            | 182.14 | S38.A       | 18:03                 | 17:49           | S38.A     | 337.0                          | 17:49           | 12.7               | 18:02          | 337.0                          | 18:02          | 8.8               | 18:11       |
| PASAJE RAPIDOS        | 4            | 86.60  | S25.A       | 22:10                 | 21:58           | SP9E.A    | 236.0                          | 21:58           | 4.9                | 22:03          | 232.0                          | 22:03          | 8.9               | 22:12       |
| CRUCEROS TURISTICOS   | 7            | 283.90 | S29.A       | 22:44                 | 22:14           | S1.A      | 10.7                           | 22:14           | 12.9               | 22:27          | 14.7                           | 22:27          | 6.0               | 22:33       |
| FERRY'S PASAJE/COCHES | 3            | 100.00 | S30.A       | 23:26                 | 23:16           | SP8.A     | 49.0                           | 23:16           | 21.6               | 23:37          | 64.6                           | 23:37          | 13.5              | 23:51       |

La observación más inmediata es la mejora sobre las esperas de los buques ferris anteriores, lo que pone de manifiesto la versatilidad de otra regla de navegación, y plantea la necesidad de considerar la flexibilidad de solapes de maniobras, como una alternativa a las situaciones de congestión, que pudieran surgir en esas franjas horarias, sin olvidar, como ya se ha explicado anteriormente, el mayor control de las operaciones, que exigiría la adopción de este tipo de medidas.

En la etapa siguiente se nos plantea entonces la idea de abordar una programación de horarios, que por una lado actúe más detenidamente sobre esa franja horaria y por otro sobre los buques objeto de esperas, manteniendo, a la vista de los resultados, esa comparativa entre reglas de navegación (IO y SPO).

Antes de abordar una posible programación de horarios, se definen valores característicos agrupados que se usarán como evaluadores para los análisis de efectividad de las posibles propuestas:

- Número de barcos que esperan en cada caso cada día.
- Tiempos medios de esas esperas.

Para obtener estos valores se extiende la simulación llevada a cabo para un día concreto a todo el periodo de estudio, los trimestres julio-septiembre de los años comprendidos entre 2014 y 2018. De esta manera, se puede evaluar estadísticamente de una manera más amplia el funcionamiento de la nueva configuración, con el tráfico que el puerto presenta en este periodo de estudio. Los

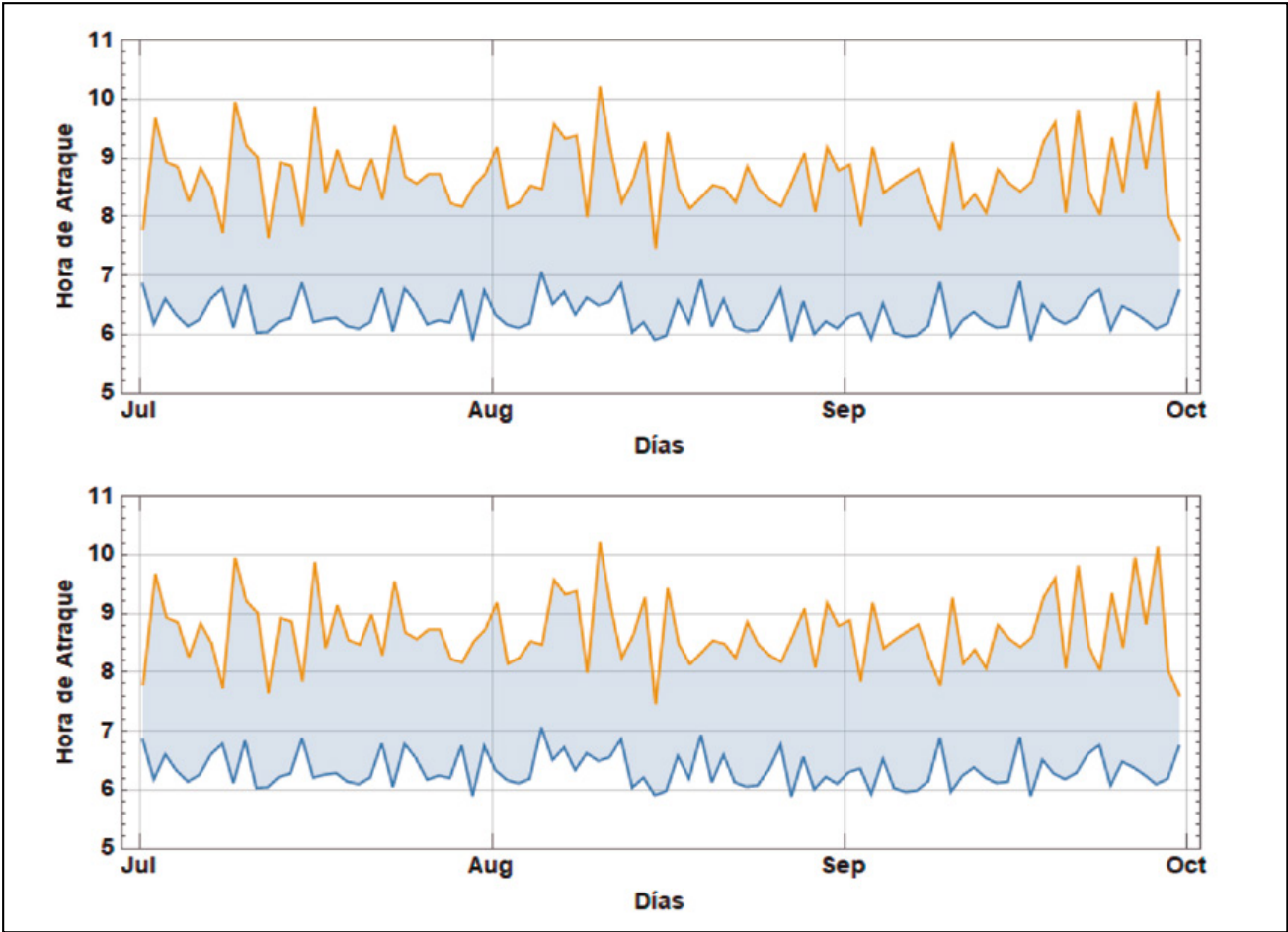
resultados obtenidos se sintetizan en la tabla que figura a continuación:

**Tabla 6.** Número de barcos y tiempos de espera, tráfico actual, alternativa B1

| Año                 | 2014 |     | 2015 |     | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     |
|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Nº barcos / día     | 6.7  |     | 7.5  |     | 7.8  |     | 7.8  |     | 7.3  |     |
| Modo de operación   | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO |
| Nº de esperas / día | 3.5  | 1.8 | 4.5  | 2.1 | 4.0  | 1.8 | 4.1  | 1.4 | 4.5  | 2.1 |
| Duración media, m   | 31.  | 6.4 | 31.  | 6.4 | 25.  | 5.7 | 25.  | 5.6 | 30.  | 6.1 |

La columna correspondiente al nº de barcos al día, se centra ahora en aquellos buques que arriban al puerto antes de las 12 del mediodía, centrando el estudio en una franja de mayor interés. Por otro lado, las filas que recogen el nº de esperas en el día y la duración media de estas esperas se refieren a la espera de aquellos buques que efectivamente esperan, es decir, aquéllos cuyo valor numérico en la columna “margen/espera” correspondiente es negativo.

Este primer análisis sobre el tráfico actual permite observar, esta vez sobre un periodo de estudio mucho mayor que un día, las diferencias obtenidas en los resultados cuando se imponen distintas restricciones a la navegación. La regla de solape parcial de operaciones disminuye considerablemente los valores correspondientes al nº de esperas y su valor medio. Para complementar este análisis se explora otro aspecto de las operaciones consideradas de forma agrupada, esto es, la repercusión de la alternativa B1 (alternativa de configuración futura del puerto, con nuevos muelles de atraque) en la



**Figura 11.** Rango de de atraque de ferris entre las 5-9 horas de la mañana, III trimestre, situación actual, alternativa B1. Reglas IO-SPO.

duración del periodo de tiempo que transcurre entre el atraque del primer ferri, y el momento en el que atraca el último ferri (entre las 5 y las 9 de la mañana). Un gráfico tipo de este análisis es el que se muestra a continuación, en el que puede apreciarse cómo la serie temporal en el segundo caso es más estrecha, indicando un valor medio menor de dicha franja, en este caso de 2.3 a 1.9 horas

Una vez cubierto el análisis del tráfico actual en la nueva configuración, bajo la simulación directa de las series de llegada, se plantea realizar una mejora sobre el mismo, programando las operaciones de acceso al puerto, respetando como hasta ahora las dos reglas de navegación (IO y SPO), esto comprendería la segunda etapa, que cubre tres programaciones: una programación exclusivamente para los

buques ferris y dos programaciones para las combinaciones de ferris y cruceros.

- a) Programación entre buques ferris: inicialmente se lleva a cabo una actuación entre los accesos de buques ferris de línea regular, cuya tipología dentro del simulador es de tipo 2 o 3. Esta programación propone una secuencia entre estos buques espaciando sus entradas 30 minutos, aplicándose esta medida entre los buques que llegan en el intervalo de 5-9 h. de la mañana, franja crítica en los accesos. Si aplicamos esta pauta al día 25 agosto de 2018 mostrado más arriba, puede verse claramente la actuación de esta pauta de programación, para la regla IO:

**Tabla 7.** Operaciones de llegada de buques. Día 25 agosto de 2018. Regla IO

| Tipo                | Tipo Estudio | Eslera | Cód. Muelle | Hora Actual de Atraque | AD Hora Llegada | Muelle B1 | AD Margen (+) / Espera (-), min | AD Hora Entrada | AD Tiempo Maniobra | AD Hora Salida | D Margen (+) / Espera (-), min | D Hora Entrada | D Tiempo Maniobra | Hora Atraque |
|---------------------|--------------|--------|-------------|------------------------|-----------------|-----------|---------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------------------------|----------------|-------------------|--------------|
| CRUCEROS TURISTICOS | 7            | 300.00 | S35.A       | 04:40                  | 04:13           | S30.A     | 254.0                           | 04:13           | 16.8               | 04:30          | 271.0                          | 04:30          | 20.1              | 04:50        |
| CRUCEROS TURISTICOS | 7            | 263.90 | S30.A       | 05:39                  | 05:10           | S29.A     | 19.7                            | 05:10           | 7.7                | 05:18          | 27.4                           | 05:18          | 7.7               | 05:25        |
| FERRYS CARGA/PASAJE | 2            | 188.40 | S34.A       | 06:09                  | 05:51           | SP11.A    | 25.7                            | 05:51           | 11.2               | 06:02          | 36.9                           | 06:02          | 17.2              | 06:19        |
| FERRYS CARGA/PASAJE | 2            | 188.30 | S33.A       | 06:24                  | 06:21           | SP12.A    | 1.7                             | 06:21           | 11.8               | 06:33          | 13.5                           | 06:33          | 15.1              | 06:48        |
| FERRYS CARGA/PASAJE | 2            | 198.99 | S1.A        | 06:40                  | 06:51           | SP13.A    | 3.2                             | 06:51           | 10.7               | 07:02          | 13.9                           | 07:02          | 16.3              | 07:18        |
| FERRYS CARGA/PASAJE | 2            | 199.10 | S3.A        | 06:50                  | 07:21           | SP14.A    | 3.0                             | 07:21           | 10.7               | 07:32          | 13.8                           | 07:32          | 18.0              | 07:50        |
| FERRYS CARGA/PASAJE | 2            | 190.50 | S37.A       | 07:49                  | 07:51           | SP15.A    | 1.3                             | 07:51           | 12.5               | 08:04          | 13.7                           | 08:04          | 20.4              | 08:24        |

Desde la perspectiva del valor medio, este espaciamiento de operaciones entre ferris produce una reducción notable del número de barcos que esperan y, en el caso de aplicación de la regla IO, del tiempo medio de espera, como se aprecia en la tabla siguiente:

**Tabla 8.** Número de barcos y tiempos de espera, tráfico actual, alternativa B1. Programación de llegadas: ferris 30'

| Año                 | 2014 |     | 2015 |     | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     |
|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Nº barcos / día     | 6.7  |     | 7.5  |     | 7.8  |     | 7.8  |     | 7.3  |     |
| Modo de operación   | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO |
| Nº de esperas / día | 2.4  | 0.7 | 3.3  | 0.8 | 2.5  | 0.8 | 2.6  | 0.6 | 2.6  | 0.9 |
| Duración media, m   | 19.  | 8.1 | 18.  | 8.5 | 18.  | 7.1 | 14.  | 5.2 | 20.  | 11. |

No obstante, un análisis un poco más detallado, para algunos días del estudio, donde la afluencia de cruceros coincide con la de buques ferris, pone de manifiesto que la aplicación de esta programación es insuficiente, trasladándose las esperas a otros buques, lo que conlleva plantear una programación sobre los cruceros, sin abandonar la ya establecida para los ferris.

- b) Programación sobre ferris (30 minutos)-cruceros (45 minutos): en este caso, además de conservarse la programación anterior, se incluye un espaciamiento de 45 minutos, tras el acceso al puerto de un crucero tipo 7, crucero pequeño para la tipología definida en el simulador. De esta manera, un intervalo de tiempo de  $\Delta FF = 30'$  en la operación de ferris sucesivos es un plazo razonable para, en condiciones normales, permitir el atraque del primero y la entrada sin esperas del segundo. En el caso de los cruceros turísticos  $\Delta CF = 45'$  puede aproxi-

mar el tiempo total de evolución hasta el atraque en condiciones climatológicas no desfavorables. Tras ejecutar la simulación con esta programación, se obtienen similarmente los resultados que se muestran:

**Tabla 9.** Número de barcos y tiempos de espera, tráfico actual, alternativa B1. Programación de llegadas: ferris 30'- cruceros 45'

| Año                 | 2014 |     | 2015 |     | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     |
|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Nº barcos / día     | 6.7  |     | 7.5  |     | 7.8  |     | 7.8  |     | 7.3  |     |
| Modo de operación   | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO |
| Nº de esperas / día | 1.0  | 0.1 | 2.3  | 0.1 | 1.3  | 0.3 | 1.3  | 0.2 | 1.7  | 0.3 |
| Duración media, m   | 6.2  | 3.3 | 5.0  | 1.2 | 8.7  | 2.8 | 6.1  | 2.7 | 8.0  | 5.6 |

Podemos observar cómo, independientemente de las restricciones impuestas a la navegación, esta segunda pauta proporciona unos valores medios menores, tanto en el nº de buques que esperan como en el valor medio de la espera, siendo los de la regla IO, todavía algo elevados.

- c) Programación sobre ferris (20 minutos)-cruceros (45 minutos): la programación anterior mejora los valores medios de tiempos de espera, pero, como es natural, debido a esas secuencias programadas la franja horaria de atraque de los ferris se incrementa. Con el fin de analizar si se consigue una reducción de esta franja y se conserva esa mejora en los tiempos de espera, se lleva a cabo una tercera programación, con un esquema similar al anterior pero fijando en intervalo entre ferris  $\Delta FF = 20'$ . Los resultados de las simulaciones agrupados para todos los terceros trimestres son los que se indican:

**Tabla 10.** Número de barcos y tiempos de espera, tráfico actual, alternativa B1. Programación de llegadas: ferris 20'- cruceros 45'

| Año                 | 2014 |     | 2015 |     | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     |
|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Nº barcos / día     | 6.7  |     | 7.5  |     | 7.8  |     | 7.8  |     | 7.3  |     |
| Modo de operación   | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO |
| Nº de esperas / día | 4.0  | 0.1 | 4.6  | 0.1 | 4.8  | 0.2 | 4.9  | 0.1 | 5.3  | 0.5 |
| Duración media, m   | 19.  | 1.5 | 24.  | 0.5 | 20.  | 1.5 | 22.  | 0.5 | 23.  | 2.3 |

En este caso, el espaciamiento de 20 minutos entre buques ferris tipo 2 o 3 no es un plazo razonable para permitir el atraque del primero y la entrada sin esperas del segundo, en condiciones normales, de ahí el incremento experimentado en la columna correspondiente a la duración media bajo la restricción IO.

Finalmente, quedaría plantear una hipótesis de tráfico futuro para el puerto y realizar un análisis de la nueva configuración con dicha hipótesis, incluyendo también dentro de este análisis una o varias de las programaciones vistas.

En relación con la hipótesis de tráfico futuro se adopta ampliar las series de llegadas diarias de barcos, en dos ferris de línea regular más. El análisis de afluencia en las primeras horas de la mañana resulta fundamental para ver la adaptación de la nueva configuración a esta ampliación de tráfico. El incremento de las series de llegadas de buques entre las 5-9 horas de la mañana, se lleva a cabo para todo el periodo de estudio, con dos ferris de tipo 2, el primer ferri se programa para entrar a la antedársena a las 5:00 h de la mañana y el segundo a las 5:30 h. Una vez definido el tráfico, se ejecuta la navegación en el simulador, se analizan las esperas producidas y sus características, recogiendo los resultados a continuación:

**Tabla 11.** Número de barcos y tiempos de espera, tráfico futuro, alternativa B1

| Año                 | 2014 |     | 2015 |     | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     |
|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Nº barcos / día     | 8.7  |     | 9.5  |     | 9.8  |     | 9.8  |     | 9.3  |     |
| Modo de operación   | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO |
| Nº de esperas / día | 5.2  | 2.5 | 6.3  | 3.1 | 6.3  | 2.7 | 6.4  | 2.6 | 6.3  | 2.6 |
| Duración media, m   | 39.  | 7.0 | 45.  | 9.3 | 39.  | 9.5 | 38.  | 7.5 | 38.  | 6.6 |

Resulta evidente que, en este caso, la duración media de las esperas, cuando se mantiene la regla IO, se ha incrementado notablemente, por ello resulta más necesario que, con el tráfico presente, el poder planificar los horarios dentro de la franja de mayor afluencia de buques. De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de la programación de distintas pautas con el tráfico actual del puerto, la programación de horarios elegida es aquella que espacia los ferris tipo 2 o 3, un intervalo de 30 minutos  $\Delta FF = 30'$  y el acceso de un buque ferri tras un crucero 45 minutos  $\Delta CF = 45'$ . Su ejecución en el simulador y el correspondiente análisis estadístico arroja los siguientes valores:

**Tabla 12.** Número de barcos y tiempos de espera, tráfico futuro, alternativa B1. Programación de llegadas: ferris 30' – cruceros 45'

| Año                 | 2014 |     | 2015 |     | 2016 |     | 2017 |     | 2018 |     |
|---------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Nº barcos / día     | 8.7  |     | 9.5  |     | 9.8  |     | 9.8  |     | 9.3  |     |
| Modo de operación   | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO | IO   | SPO |
| Nº de esperas / día | 6.3  | 0.1 | 6.9  | 0.1 | 7.1  | 0.3 | 7.2  | 0.2 | 7.6  | 0.5 |
| Duración media, m   | 25   | 2.1 | 30.  | 1.1 | 29.  | 1.9 | 30.  | 1.9 | 31.  | 2.0 |

De forma genérica para la regla de operación IO, se produce una ligera mejora respecto a la situación sin programación, si bien afecta a un mayor nº de barcos. Cuando se emplea el solape parcial de operaciones, los resultados son similares a los obtenidos con aplicación de la misma pauta para el tráfico actual, como puede advertirse de la observación de ambas tablas; luego en principio, la incorporación planteada parece apropiada.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un conjunto de elementos metodológicos para la simulación del tráfico portuario que permiten el estudio de las operaciones bajo diferentes hipótesis con el objetivo de asegurar la fluidez del tráfico. En primer lugar, la descripción de las zonas navegables del puerto por medio de un grafo y su empleo con datos del Sistema de Identificación Automática (AIS), o con resultados de simulaciones realistas de maniobras, describe de forma muy concisa, pero adecuada, las operaciones durante la estancia de un barco en puerto, reduciendo el volumen de datos de trayectorias, y generando información relevante para un análisis individual o agregado, y tanto desde el punto de vista de los buques como de la ocupación de las instalaciones portuarias.

El análisis agregado, tanto para el estudio de la situación actual como para alternativas de diseño, permite caracterizar estadísticamente las operaciones en función del tipo de buque y muelle de destino, y sirve de base para el establecimiento de un simulador de operaciones. El simulador de eventos discretos que se ha descrito utiliza como datos de entrada series de llegadas, como programaciones propuestas por el usuario, junto con tablas de asignación de atraques, en función de sus tipos y tablas de caracterización estadística de los tiempos de maniobra en los accesos. Asimismo permite aplicar diferentes reglas de navegación, y proporciona resultados de tiempos de espera y márgenes de no utilización del acceso, previos a cada llegada para facilitar el ajuste sucesivo de programaciones de líneas regulares.

El conjunto de estas técnicas se ha aplicado para el estudio de una alternativa de disposición de atraques en el puerto de Palma, comprobando las posibilidades de explotación indicadas. La aplicación de un simulador de eventos discretos para el análisis del tráfico bajo la nueva configuración permite combinar las variables de tráfico con distintas reglas o restricciones que se impongan a la navegación en el interior del puerto. La disponibilidad de los datos permite a su vez tener una mayor cobertura temporal, en nuestro caso los análisis se han realizado para los buques tipo que operan en el puerto y para el periodo anual (3er trimestre) de mayor intensidad de tráfico desde el 2014 al 2018. Si bien se ha realizado este análisis únicamente para las operaciones de entrada al puerto, podría considerarse incluir las operaciones de salida e incluso recoger las situación de los atraques de la dársena en el momento en que llega el primer ferri de la mañana.

Las distintas pautas de programación aplicadas, combinando buques (cruceros y ferris), intervalos de tiempo entre llegadas de los mismos y reglas de navegación, muestran unos resultados bastante satisfactorios para la regla que permite el solape de operaciones, pudiéndose

constituir en sí misma, una pauta de actuación sin considerar ninguna programación de horarios, (sería interesante confirmar esta pauta fuera, por ejemplo, de temporada alta o con unas condiciones meteorológicas menos severas). Por otro lado, si se actúa sobre la programación de entrada de los buques en la temporada de mayor intensidad de tráfico, la actuación conjunta sobre distintos tipos de buques arroja un mejor resultado que cuando se hace sólo sobre un único tipo, así este estudio muestra que valores en el intervalo de 20-30 minutos para los ferris y 45 minutos para los cruceros dan resultados muy aceptables, frente a una programación con intervalos de 30 minutos tan solo sobre los ferris, cuando confluyen con una alta intensidad de cruceros.

Finalmente, convendría resaltar que podría resultar de interés para la planificación futura, además de abarcar aquellos aspectos no tratados y ya comentados en párrafos anteriores, un desarrollo de simulación más integral para el conjunto de las operaciones marítimas.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Algunos de los elementos metodológicos del trabajo que se presenta han sido desarrollados con ocasión del encargo realizado por la Autoridad Portuaria de Baleares y Puertos del Estado al CEDEX, a los que se agradece la motivación para el desarrollo de unas técnicas que se espera puedan ser de utilidad en otros casos de estudio y punto de partida para sucesivas evoluciones. Se agradece en particular la actitud colaborativa e implicada de varios departamentos de la comunidad portuaria durante el desarrollo de los estudios: capitanía marítima, prácticos de puerto,

servicios técnicos de la Autoridad Portuaria. Esta implicación ha servido de guía fundamental en el perfilado de los trabajos de aplicación al puerto a lo largo de su desarrollo.

Igualmente, se reconoce la colaboración de M<sup>a</sup> Eugenia Prieto y Marcos García Menchón, de la Unidad de Maniobra de Buques del CEDEX, que han proporcionado la información sin la que no habría sido posible desarrollar una parte del trabajo aplicado.

## 8. REFERENCIAS

De la Peña, I., Freire, M.J., López, B., y Pais, C. (2019). The role of simulation in the Ports and Maritime Industry: Practical experiences and outlook for the new generation of Ports 4.0. *An International Research Conference on Maritime Affairs, Carcavelos (Cascais, Portugal)*.

Grassa, J.M., Lloret, A., Jiménez, M., y Moreno, I. (2019). Estudio del tráfico marítimo interinsular en relación con colisiones entre buques y cetáceos en las islas Canarias, *Ingeniería Civil*, nº 194, pp. 5-19.

Rodrigue, J.P., Comtois, C., y Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems*. Oxon (UK)/New York (USA): Routledge.

Rodríguez Pérez, F. (1977). *Capacidad de los muelles*. Servicio de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Madrid: MOP.

Taylor, N., Human, C., Kruger, K., Bekker, A., y Basson, A. (2019). Comparison of Digital Twin Development in Manufacturing and Maritime Domains. *Service Oriented. Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future, Proceedings of Sohoma 2019*, pp. 158-170. Springer.

Tortosa, E., y Rebollo, J.F. (2010). La red AIS portuaria: La tecnología AIS aplicada a la explotación portuaria y a las ayudas a la navegación. *Puertos*, nº 158, pp. 9-21.