

Análisis de la capacidad del Puerto de Sevilla mediante simulación con ARENA*

Pablo Cortés, Jesús Muñuzuri, José Guadix, Juan Larrañeta, Luis Onieva

Grupo de Ingeniería de Organización. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. C/ Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla. pca@esi.us.es, munuzuri@esi.us.es, guadix@esi.us.es, astola@us.es, onieva@esi.us.es

Resumen

El Puerto de Sevilla es el único puerto comercial interior existente en España. En este trabajo se realiza un análisis de la capacidad del Puerto de Sevilla. En el análisis de la capacidad están implicados una gran cantidad de factores. Para su análisis se ha empleado la simulación mediante la aplicación ARENA.

El ámbito de la simulación cubre: la llegada del buque; la asignación del muelle; la salida del barco; la entrada y salida de camiones; el análisis en el terminal de contenedores; el análisis en las instalaciones para cemento "L. Asland" y para cereales "Muñoz Chapuli", así como el resto de muelles que son considerados de forma uniforme.

La simulación permite medir los valores medios y máximo del buque en el sistema; tiempo del barco en el muelle. Así como los valores medio y máximo de las siguientes variables: almacén Batán; almacén Centenario; almacén Tablada exterior; tinglados Tablada; cemento en silos de las instalaciones para cemento "L. Asland"; cereales en silos de las instalaciones para cereales "Muñoz Chapuli"; y contenedores para cada empresa simulada. Para ello se considera el análisis detallado de los valores de las colas de ocupación de los recursos: muelles; prácticos; amarradores; y esclusa.

Palabras clave: Puerto, simulación, capacidad

1. Introducción

El Puerto de Sevilla es el único puerto comercial interior existente en España, situado a 80 kilómetros de la desembocadura del Guadalquivir. Está enclavado en el mismo centro de la ciudad, capital de Andalucía y principal foco económico, cultural y artístico del sur de Europa. Dispone de gran facilidad de comunicación, debido a la cercanía con el aeropuerto internacional y la buena red ferroviaria disponible. Es en todos estos aspectos donde reside parte de la importancia del Puerto de Sevilla. En este trabajo se realiza un análisis de la capacidad del Puerto de Sevilla. Éste es un amplio concepto, en el que están implicados una gran cantidad de factores. Estos factores son los que se abordan en este estudio y que, posteriormente, son tenidos en cuenta para realizar la simulación. La simulación ha sido llevada a cabo con ARENA 5.0. Existen pocas referencias de estudios similares en la bibliografía, las principales están inspirados en la tradición Báltica en este tipo de estudios, Merkuryev *et al.* (1998), Merkuryev *et al.* (2000) y Merkuryeva *et al.* (2000).

* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en un proyecto de investigación financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología con referencia DPI2001-2454, titulado "Gestión logística de puertos interiores (LOGINPORTS)": <http://io.us.es/proyectos/LOGINPORT/Loginport.htm>.

2. Escenario de simulación

El escenario de simulación parte de la adaptación al entorno de simulación de la realidad geográfica del Puerto de Sevilla, que se recoge en la figura 1. En ella se caracteriza la ría del Guadalquivir, la esclusa, los muelles, dársenas, etc.



Figura 1. Ámbito de la simulación para el Puerto de Sevilla

Cada uno de los muelles, referidos en la figura, dispone de diversos atraques. Así el Muelle del Centenario tiene 6, 4 el del Batán y 6 el de Tablada.

2.1. Descripción del tráfico portuario

La descripción del tráfico portuario, basada en los informes anuales de la Autoridad Portuaria de Sevilla, responde a los porcentajes que refleja la tabla 1. Suponen más del 92% del tráfico del Puerto de Sevilla. Los datos mostrados se emplearon para realizar las simulaciones.

Tabla 1. Composición del tráfico portuario en la Ría del Guadalquivir

Mercancía	Muelle	Número de buques	Porcentaje (%)
Contenedores	Centenario	83	33.74
Cereales	Centenario	47	7.32
Cementos	Batán Norte	18	19.11
Chatarra	Tablada	12	4.88
Chatarra	Batán Norte	16	6.5
Siderúrgicos	Centenario	11	4.47
Siderúrgicos	Batán Norte	9	3.67
Cereales	Tablada	9	3.67
Abonos	Tablada	9	3.67
Abonos	Batán Norte	6	2.44
Siderúrgicos	Tablada	3	1.22

Para la navegación del buque por la ría del Guadalquivir los aspectos más importantes son los relacionados con los recursos que pueden limitarla. Éstos son los prácticos, los amarradores y la esclusa.

2.2. Descripción de las mercancías transportadas

También, hay que prestar atención a la descripción y composición de las mercancías con origen y destino el Puerto de Sevilla. Así, los buques de contenedores se destinan a la terminal de contenedores, que engloba los atraques 1 y 2 del Centenario. Los buques de las empresas

Contenemar y TMS van al muelle 1, mientras que los de la empresa Pinillos se destinan al muelle 2 del Centenario. Las grúas que emplean son las destinadas al transporte de contenedores, denominadas en la simulación como grúa de contenedores 1 y 2. Ambas tienen un rendimiento medio de 30 cont./hora. Los contenedores, tanto los descargados de los buques como por los camiones, se depositan en la terminal de contenedores de la empresa en cuestión. Todas tienen una capacidad media de unos 700 TEUs que, aplicando el coeficiente de 1,35 TEUs/cont., equivale a 520 contenedores aproximadamente.

Los buques con cereales son destinados a los muelles 3 y 4 del Centenario, y al 3 y 4 de Tablada. Los buques que llegan vacíos, para cargarse de cereales, se destinan sólo a los muelles 3 y 4 del Centenario. Mientras que los cargados llegan a los 4 muelles, con una mayor probabilidad para ir hacia los muelles de Tablada, y si éstos están ocupados, van hacia los del Centenario (si están disponibles). La carga de cereales es una normal de media 30 y desviación de 8, multiplicada por 100. Los buques que atracan en los muelles 3 y 4 del Centenario, tanto para la carga como para la descarga, depositan y almacenan su mercancía en los silos de cereales Muñoz Chapuli, con capacidad para 12.000 ton. Mientras que los buques atracados en los muelles 3 y 4 de Tablada depositan su mercancía en los tinglados de éstos muelles, con una capacidad total para 110.000 ton.

Los buques con chatarra se destinan a los muelles 3 y 4 del Batán Norte y a los 6 y 5 de Tablada. Como el tráfico de estas mercancías es superior en el muelle del Batán, primeramente se destinan al muelle 4 del mismo y después al 6 de Tablada. Si están ocupados se continúa con el 3 del Batán y el 5 de Tablada, en este orden. La chatarra se deposita en la superficie dispuesta para los acopios descubiertos en el muelle del Batán Norte (capacidad para 36.000 ton.) y en el muelle de Tablada (capacidad para 36.000 ton.).

Los buques con productos siderúrgicos se destinan al muelle 5 del Centenario, que es de dedicación exclusiva para esta mercancía. En caso de que esté ocupado se envía el buque al muelle 4 del Centenario, 3 del Batán y 5 de Tablada, en este orden. Estos muelles no son de dedicación exclusiva y ya se han descrito previamente. Los productos siderúrgicos (alambón, hierro, bobinas, etc.) se depositan en los acopios descubiertos del muelle en cuestión durante una normal de media 156 horas (6,5 días) y desviación típica de 48 horas, igual que en el caso de la chatarra. Para el muelle del Centenario la capacidad para los acopios descubiertos es de 50.000 ton.

Todos los buques con cemento son descargados en el muelle del Batán Norte, concretamente en los muelles 1 y 2 del mismo (preferentemente en el 1). La carga de cemento se define por una normal de media 45 y desviación de 15, multiplicada por 100. La mercancía descargada es depositada en los silos para cemento, de la empresa L. Asland. Estos silos tienen una capacidad de 7.500 ton. cada uno.

Los buques con abonos (fertilizantes, potasa o similares) se destinan principalmente al muelle 2 del Batán Norte, que se usa también para el cemento. En caso de que dicho muelle esté ocupado se destinan al muelle 1 y 2 de Tablada, que se destinan exclusivamente a este tipo de mercancía. Si el buque atraca en el muelle 2 del Batán Norte la mercancía se deposita, por medio de las grúas correspondientes a este muelle, en la superficie para acopios descubiertos (la misma que para chatarra y productos siderúrgicos). Si el buque atraca en el muelle 1 ó 2 de Tablada se deposita la mercancía en los tinglados de dicho muelle durante el mismo tiempo que los cereales en los tinglados.

Los valores que fueron considerados para el análisis de la simulación son los siguientes:

- Tiempo medio y máximo del buque en el sistema: proporciona una herramienta para poder comparar entre los distintos tráficos. Este tiempo contabiliza la estancia del buque en el sistema, desde su llegada inminente a la entrada de la ría hasta su salida por la misma.
- Tiempo del barco en el muelle: mide el tiempo desde que el buque atraca en el muelle hasta que abandona el mismo. Incluye la estancia del buque en la cola del muelle en cuestión, por lo que es una variable bastante significativa.
- Valores medio y máximo de las siguientes variables:
 - o Almacén Batán: indica la superficie utilizada (en toneladas) para los acopios descubiertos en el muelle del Batán Norte. La capacidad máxima es de 36.000 ton.
 - o Almacén Centenario: idéntico al anterior pero para el muelle del Centenario, con una capacidad máxima de 50.000 ton.
 - o Almacén Tablada exterior: indica la capacidad utilizada de las toneladas disponibles para los acopios descubiertos en el muelle de Tablada. Capacidad máxima de 36.000 ton.
 - o Tinglados Tablada: indica las toneladas utilizadas de los tinglados disponibles en el muelle de Tablada. Máxima capacidad de 110.000 ton.
 - o Cemento: indica las toneladas almacenadas en los silos de las instalaciones para cemento L. Asland. Son dos silos de capacidad máxima 7.500 ton. (15.000 ton. entre ambos).
 - o Cereales en silos: indica las toneladas almacenadas en las instalaciones para cereales Muñoz Chapuli. Se dispone de 12 silos de capacidad máxima de 1.000 ton. cada uno (12.000 ton. en total).
 - o Contenedores i: indica el número de contenedores almacenados en la terminal de contenedores de la empresa i ($i=A, B$ y C), tanto los contenedores a cargar como los descargados. No tiene una capacidad máxima específica, pero el número medio de contenedores debe oscilar cercano a las 600 unidades.
- Contadores: Para los siguientes elementos:
 - o Camiones cemento: para las instalaciones de cemento L. Asland.
 - o Camiones cereales: instalaciones de cereales Muñoz Chapuli.
 - o Camiones contenedor i: terminal de contenedores i ($i=A, B$ y C).
- Valores de las colas de ocupación de los recursos:
 - o Muelles
 - o Prácticos
 - o Amarradores
 - o Esclusa

Con estos valores se obtiene una medida de las limitaciones del Puerto de Sevilla. Cabe destacar que la ocupación de las grúas de pórtico no se puede considerar independientemente de los muelles, ya que la ocupación de un muelle implica la ocupación de una grúa. Es por eso que no se analiza las grúas como recursos.

3.1. Análisis del tráfico independiente

Se considera el tráfico de buques de las distintas mercancías pero de forma individual, es decir, sólo llega un buque de cada tipo a un muelle en cuestión. El objetivo buscado es conseguir los valores medios de estancia de los buques en los distintos muelles. Como en estos casos no hay colas de espera a los muelles se obtienen unos tiempos que sirven de referencia para una futura comparación con casos en los que el tráfico sea agregado.

Para el tráfico de contenedores se realizaron un total de 16 simulaciones en las que en cada una de ellas sólo llegaba un buque del tipo 1 (contenedores). Asimismo se realizaron 4 simulaciones para los 4 tipos de buques considerados (uno por cada empresa). Cabe destacar que las posibles variaciones en los tiempos vienen determinadas por la elección entre el uso de 1 ó 2 de las grúas para contenedores. La tabla 3 muestra los resultados.

Tabla 3. Tiempos en muelle para contenedores

Empresa	Tiempo en muelle	Número de replicación				Valor medio	Desviación típica
		1ª	2ª	3ª	4ª		
1	Centenario 1	17,82	18,31	18,87	17,86	18,21	0,49
2	Centenario 1	17,56	18,32	18,63	18,33	18,21	0,46
3	Centenario 2	18,99	18,43	18,91	17,81	18,53	0,54
4	Centenario 1	10,33	10,25	18,77	9,88	11,84	4,31

Para los buques con cereales se consideraron todas las posibilidades. Estas son que los buques fueran descargados, dirigiéndose hacia los muelles 3 y 4 del Centenario, y que los buques fueran cargados, yendo a los 4 muelles posibles. Hay que destacar que para el caso de los buques descargados el tiempo es independiente de las grúas, ya que éstas no participan en el proceso. Para el caso de los buques cargados hay una clara diferencia entre los que van al muelle del Centenario y los que van al muelle de Tablada, tal y como se aprecia en la tabla 4. Esta diferencia reside en la diferencia de rendimiento de las grúas. La diferencia también se aprecia entre el muelle 3 y 4 del Centenario (las grúas del muelle 3 tienen mejor rendimiento).

Tabla 4. Tiempos en muelle para cereales

Buque cargado	Tiempo en muelle	Número de replicación				Valor medio	Desviación típica
		1ª	2ª	3ª	4ª		
NO	Centenario 3	16,17	17,5	15,79	20,14	17,32	1,97
	Centenario 4	16,17	17,5	15,79	20,14	17,32	1,97
SI	Centenario 3	7,88	10,07	13,81	14,18	11,16	3,04
	Centenario 4	10,55	9,94	13,84	12,4	11,58	1,78
	Tablada 3	14,61	13,07	14,51	15,47	14,39	0,99
	Tablada 4	12,2	16,73	11,06	14,39	13,43	2,50

Los buques con chatarra tienen 4 posibles destinos. Debido a la diferencia en el rendimiento de las grúas, es reseñable la diferencia en los tiempos entre los buques que atracan en el muelle del Batán Norte y los que atracan en Tablada. Con respecto a los buques con productos siderúrgicos (bobinas, alambrón, hierro, etc.) se destinan principalmente al muelle 5 del Centenario. Por otro lado, los buques cargados de cemento van a los muelles cercanos a las instalaciones para cemento L. Asland, es decir, los muelles 1 y 2 del Batán Norte. Finalmente, para los buques cargados de abono, se observan tiempos en el muelle de Tablada muy similares, ya que las grúas empleadas son las mismas. La tabla 5 muestra los resultados.

Tabla 5. Tiempos en muelle para resto de productos

Producto	Tiempo en muelle	Número de replicación				Valor medio	Desviación típica
		1ª	2ª	3ª	4ª		
Chatarra	Batán 4	15,76	20,75	17,97	18,15	18,07	2,04
	Tablada 6	9,68	14,06	9,71	13,4	11,54	2,35
	Batán 3	17,34	19,12	15,51	19,51	17,80	1,84
	Tablada 5	6,82	12,64	12,02	14,81	11,13	3,39
Productos siderúrgicos	Centenario 5	16,9	24,58	20,8	27,1	22,00	4,46
	Centenario 4	13,53	14,47	13,58	11,81	13,31	1,11
	Batán 3	18	20,94	15,93	21,72	19,00	2,68
	Tablada 5	12,07	14,63	11,33	14,51	13,05	1,69
Cemento	Batán 1	22,2	30,11	22,77	31,97	26,41	5,00
	Batán 2	22,17	25,23	22,98	33,28	25,57	5,08
Abonos	Batán 2	14,44	18,44	14	15,1	15,40	2,01
	Tablada 1	11,31	13,07	14,41	15,47	13,47	1,80
	Tablada 2	9,37	16,73	13,03	14,39	13,09	3,08

3.2. Análisis del tráfico real

El análisis del comportamiento real del tráfico en el Puerto de Sevilla se observa analizando el tráfico real. Para esta situación se simula como tiempo entre la llegada de buques una normal de media 13 horas y desviación típica de 2 horas. Este valor se corresponde con el tráfico aproximado considerándose la llegada de 223 buques en 4 meses ($4 \times 30 \times 24 / 223 = 12,9$), asignando una desviación mayor o menor con el fin de incrementar el carácter de aleatoriedad a la simulación. El periodo considerado en la simulación es de 90 días. Una vez ejecutada la simulación se produjo la llegada de un total de 166 buques. En la tabla 6 se ven los resultados obtenidos en relación a los tiempos de los buques, tanto en el sistema como en los muelles.

Tabla 6. Tiempos de buques en tráfico real simulado

Variable	Tiempo medio	Tiempo máximo	Desviación típica
Tiempo buque en sistema	34,55	117,40	12,38
Muelle Centenario 1	21,11	69,32	11,21
Muelle Centenario 2	24,58	109,74	20,1
Muelle Centenario 3	18,21	28,08	3,81
Muelle Centenario 4	16,21	31,24	8,34
Muelle Centenario 5	23,5	30,18	3,65
Muelle Batán 1	30,1	39,83	5,66
Muelle Batán 2	19,58	38,34	5,01
Muelle Batán 3	23,61	23,61	0
Muelle Batán 4	21,3	25,81	2,91
Muelle Tablada 1	11,99	11,99	0
Muelle Tablada 2	0	0	0
Muelle Tablada 3	14,96	16,21	0,84
Muelle Tablada 4	0	0	0
Muelle Tablada 5	0	0	0
Muelle Tablada 6	13,06	15,54	1,51

Observando los valores se aprecia escasa variación entre los máximos y los valores medios, a excepción de los muelles 1 y 2 del Centenario. Esto es claramente debido a que los buques de contenedores tienen un tráfico mucho más elevado que otra clase de buques, contando sólo con 2 muelles para el atraque. El dato de la alta ocupación de estos muelles también se puede contrastar observando el estado de las colas de dichos recursos. Como consecuencia del elevado valor del tiempo máximo en el muelle 2 del Centenario aparece otro valor elevado para el tiempo máximo del buque en el sistema. Sin embargo, observando la media, se puede concluir que es un valor más o menos razonable. Por otra parte, debido a la distribución del

tráfico que se dirige al muelle de Tablada, muy reducida, se observa que en muchos de estos muelles no se produce el atraque de ningún buque.

Adicionalmente, en la tabla 7 se presentan las estadísticas del estado de las colas de los recursos. En la tabla sólo se muestran las colas que suponen algún retraso para los buques.

Tabla 7. Estado de colas en tráfico real simulado

Cola	Valor máximo	Tiempo de espera
Esclusa de entrada	1	0,35
Esclusa de salida	1	0,35
Muelle 1 Centenario	1	13,88
Mulle 2 Centenario	1	12,97

En el caso de los muelles, los únicos que experimentan formación de colas son los 1 y 2 del Centenario. La esclusa es otro de los recursos que presenta alguna entidad en sus colas. Sin embargo, atendiendo al tiempo de espera de los buques se puede concluir que no es un recurso que limite la capacidad del Puerto. Si bien sí puede limitar el tipo y tamaño de buque que entre (aunque esta cuestión no se analiza en este estudio). Con lo que respecta a los demás recursos considerados, prácticos y amarradores, no hay ningún caso en que las entidades (buques) deban de esperar a que éstos queden disponibles.

En la tabla 8 se reflejan los valores de ocupación de los almacenes.

Tabla 8. Ocupación de almacenes en tráfico real simulado

Variable	Valor medio	Valor máximo	% medio de ocupación
Almacén batán	6492,95	14620	18
Almacén centenario	6513,29	11800	13
Almacén tab ext	2079,88	4300	6
Tinglados tablada	5975,67	10240	5
Cemento	4264,42	12674	28
Cereales en silos	5017,2	8015	42
Contenedores A	461	977	-
Contenedores B	584	1289	-
Contenedores C	742	1453	-

Observando estos valores, se verifica que en ningún caso se sobrepasa el límite de capacidad. Es más, en los almacenes para los acopios descubiertos y los tinglados, el nivel de ocupación obtenido es muy inferior del dispuesto en las instalaciones. Con lo que respecta a las instalaciones especiales de cemento y cereales, como debe de ser, en ningún caso se sobrepasa el nivel máximo establecido. Atendiendo a los valores medios, ambos se sitúan por debajo de la mitad de la capacidad máxima. En cuanto a los contenedores, el valor medio de éstos está entre los valores deseables. Finalmente, los niveles máximos de las terminales son niveles algo elevados, debido a la superposición en la terminal de los contenedores de un barco con los del siguiente, dado el carácter aleatorio de la simulación.

El tráfico de los camiones de las instalaciones especiales se expresa en la tabla 9.

Tabla 9. Tráfico de camiones en tráfico real simulado

Contador	Valor	Camiones diarios
Camiones cemento	2481	28
Camiones cereales	2728	30
Camiones contenedores A	7719	86
Camiones contenedores B	10968	122
Camiones contenedores C	12237	136

Para las instalaciones de cemento y de cereales el número medio de camiones diarios es bastante normal. Esto es síntoma de que la capacidad de dichas instalaciones no ha sido sobrepasada, ya que el programa está diseñado para que el nivel de almacenamiento no se sobrepase nunca debido a la llegada de los camiones. En las terminales de contenedores, estos valores son demasiado elevados, excepto para los camiones de cemento. Que estos valores sean tan elevados es una indicación del esfuerzo necesario para mantener los niveles de las terminales en unos niveles razonables. En otras palabras, un mayor tráfico de camiones implica que el nivel de almacenamiento sea más bajo. La causa más directa del alto tráfico de camiones contenedores es el elevado tránsito de contenedores por las instalaciones. Pero también hay que considerar el factor considerado al pasar de TEUs a contenedores (1,35 TEUs/contenedores), ya que este es un promedio y en la actualidad la mayoría de los contenedores es de 2 TEUs.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra los principales resultados de la simulación de la capacidad del Puerto de Sevilla. De él se deriva que las instalaciones actuales del Puerto permiten cubrir los flujos entrantes de mercancías al mismo, salvando puntuales dificultades en el tráfico de contenedores. Por ello el incremento del volumen de negocio del Puerto de Sevilla debe venir de la mano de acciones comerciales destinadas a captar nuevos mercados, así como principalmente mediante acciones de mejora de las infraestructuras de acceso. Lo que supone incrementar el dragado de la Ría y el amejoramiento de la esclusa. Esto permitirá el acceso de barcos de mayor calado.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento a la Autoridad Portuaria de Sevilla por la colaboración prestada, en especial a su Presidente D. Manuel Fernández González, así como a su Director D. Fausto Arroyo Crejo. De igual modo también expresamos nuestro agradecimiento a la empresa Serviport Andalucía, S.A. y a su Director D. Jesús González Ramírez. La colaboración de ambas instituciones se ha plasmado además de en el apoyo material al desarrollo de los trabajos, en la financiación de diversas actividades asociadas a los mismos.

Referencias

Merkuryev, Y.; Kamperman, F.; Visipkov, V.; Smits, A. (2000). ARENA-based simulation of logistics processes at the Baltic container terminal. *Proc.14th European Simulation Multi-conference - Simulation and Modelling: Enablers for a Better Quality of Life*, pp. 433-437.

Merkuryev, Y.; Tolujew, J.; Blümer, E.; Novitsky, L.; Ginters, E.; Vitorova, E.; Merkuryeva, G.; Pronins, J. (1998), A modelling and simulation methodology for managing the Riga Harbour container terminal, *Simulation* 71(2), 84-95.

Merkuryeva, G.; Merkuryev, Y.; Tolujev, J. (2000). Computer Simulation and Metamodelling of Logistics Processes at a Container Terminal. *Studies in Informatics and Control*, Vol. 9 No. 1, art. 06.

Puerto de Sevilla. (2001). *Plan Director del Puerto de Sevilla*.

Puerto de Sevilla. (2002). *Manual de Procedimientos PGC 4.01. Procedimientos Operativos de Calidad*.

Puerto de Sevilla. (2002). *Memoria anual. Informe de gestión*.