



# **ACTUALIZACIÓN DEL PRONÓSTICO SOBRE OFERTA Y DEMANDA DE SERVICIOS MARÍTIMOS DE LÍNEA ENTRE CHILE Y EL MUNDO**

## **Equipo de trabajo:**

Lourdes Trujillo (directora)

Casiano Manrique-de-Lara-Peñate; Dolores R. Santos-Peñate; Alba Martínez-López; Pilar Caamaño; Marianela González; Ivone Pérez; Jorge Pérez; Jose María Grisolía; Manuel Herrera-Rodríguez; Federico Inchausti-Sintes

## Índice contenido

1	Introducción general.....	1
2	Análisis de la demanda de largo plazo en los puertos estatales de la región de Valparaíso .....	5
2.1	Introducción .....	5
2.2	Comentarios sobre la metodología econométrica utilizada .....	5
2.3	Comentarios económicos sobre el informe.....	9
2.4	Una propuesta alternativa. La demanda de servicios portuarios: una demanda derivada.....	11
2.5	Conclusiones .....	12
3	Estudio de planificación de las flotas que operan entre Chile y el resto del mundo.....	14
3.1	Introducción .....	14
3.2	Marco de referencia.....	14
3.3	El modelo.....	18
3.3.1	Definición de las rutas .....	18
3.3.2	El problema de despliegue de flotas.....	19
3.3.3	La función objetivo .....	20
3.3.4	Las restricciones .....	22
3.3.5	Corrección de la solución obtenida.....	25
3.3.6	Observaciones sobre el procedimiento de solución.....	27
3.4	Principales datos utilizados en el modelo .....	27
3.4.1	Base de datos de comercio exterior .....	27
3.4.2	Datos de buques y puertos.....	37
3.4.3	Rutas y datos utilizados en el modelo .....	47
3.5	Diseño de las simulaciones.....	50
3.6	Presentación de los resultados obtenidos.....	51
3.7	Conclusiones .....	63
4	Modelo de identificación de autopistas del mar competitivas en Chile y sus flotas óptimas .....	64
4.1	Introducción y Objetivos .....	64
4.2	Motivación.....	67
4.3	Situación actual .....	69
4.4	Modelo.....	77
4.4.1	Formulación .....	77

4.5	Datos .....	90
4.5.1	Lógica de las redes de transporte y matrices de distancias .....	90
4.5.2	Probabilidades de distribución de mercancía en los nodos.....	91
4.5.3	Costes unitarios del transporte por carretera y coste del MDO .....	99
4.5.4	Costes unitarios para las emisiones contaminantes en Chile. ....	100
4.6	Simulaciones y resultados preliminares .....	101
4.6.1	Análisis y conclusiones de las simulaciones preliminares .....	111
4.7	Datos específicos para los puertos seleccionados.....	114
4.8	Simulaciones y resultados para las cadenas intermodales articuladas a través de las autopistas del mar seleccionadas.....	116
4.9	Sensibilización de la optimización de las flotas .....	126
4.9.1	Selección de variables .....	126
4.9.2	Resultados de la sensibilización.....	128
4.9.3	Conclusiones de la sensibilización.....	157
4.10	Conclusiones .....	159
5	Sistema portuario chileno.....	162
5.1	Introducción .....	162
5.2	Regulación y evolución del Sistema Portuario Chileno .....	162
5.3	Evolución del tráfico de mercancías en el sistema portuario chileno (2006-2014)	165
5.4	Puertos comerciales de uso público: Empresas estatales .....	171
5.5	Tráfico de mercancías y factores productivos de los puertos comerciales de uso público: Empresas estatales y otras .....	177
5.5.1	Evolución del tráfico de mercancías (2006-2014) .....	178
5.5.2	Tráfico de mercancías y factores productivos en la actualidad (2014)	184
5.6	Puerto Valparaíso y Puerto San Antonio .....	189
5.7	Conclusiones .....	193
6	Conclusión general .....	195
7	Referencias .....	199
8	Anexo .....	206

## Índice de tablas

Tabla 1. Localizaciones alternativas y especificaciones de los PGE .....	2
Tabla 2. Especificaciones técnicas de los PGE .....	3
Tabla 3. Frecuencias de servicio y tamaños de buque (año 2014).....	17
Tabla 4. Comercio exterior de contenedores en Chile 2015 (TEUs).....	29
Tabla 5. Comercio exterior de contenedores en Chile 2015 ajustado por el dato de movimiento de contenedores (TEUs).....	30
Tabla 6. Contenedores exportados en 2015 según país y región (TEUs) .....	32
Tabla 7. Contenedores importados en 2015 según país y región (TEUs) .....	32
Tabla 8: Flujo de contenedores por origen y destino según puertos en 2015 (TEUs por año).....	34
Tabla 9. Matriz final de flujos de contenedores por origen y destino según puertos en 2015 (TEUs semanales) .....	36
Tabla 10. Consumo por tipo de buque .....	38
Tabla 11. Tiempos de carga y descarga por tipo de buque .....	39
Tabla 12. Costes operativos semanales por tipo de buque (USD).....	40
Tabla 13. Coste de movimiento de contenedores (USD) .....	42
Tabla 14. Costes de Transbordo (USD/TEU).....	43
Tabla 15. Costes de atraque por puerto y tipo de buque (USD) .....	44
Tabla 16. Coste de practica y remolque por tipo de buque (USD).....	45
Tabla 17. Tasa por buque y TEU antes y después de la ampliación del Canal de Panamá .....	46
Tabla 18. Puertos de recalada .....	47
Tabla 19. Rutas utilizadas.....	47
Tabla 20. Coeficientes de variación de la demanda .....	51
Tabla 21. Descripción de valores presentados en el fichero de resultados .....	53
Tabla 22. Utilización de la capacidad disponible en los puertos de cada ruta (%) .....	63
Tabla 23. Necesidades de transporte actual para líneas MOs .....	72
Tabla 24. Estimación de necesidad de servicio de transporte anual para líneas MOs en cada sentido.....	73
Tabla 25. Restricciones del modelo para etapa I y II .....	89
Tabla 26. Comparación Chile/Portugal en el 2014 (elaboración propia).....	101
Tabla 27. Factores de coste unitarios para contaminantes en el 2015 (€/kg contaminante) .....	101
Tabla 28. Parámetros de configuración para NSGA-II. (elaboración propia).....	102
Tabla 29. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MOs en las redes de transporte de Etapa I con San Antonio como hub .....	107
Tabla 30. Comparación de los rangos de resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MOs para las etapas 1 y 2 .....	109
Tabla 31. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MOs en las redes de transporte de Etapa II con San Antonio como hub .....	111
Tabla 32. Comparación de tasas portuarias para los puertos candidatos a 'hub' entre los escenarios preliminar y actual.....	118

Tabla 33. Comparación de tasas portuarias para los puertos candidatos a 'spoke' entre los escenarios preliminar y actual.....	119
Tabla 34. Comparación de los resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MOs seleccionadas.....	120
Tabla 35. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MOs en las redes de transporte para escenarios actuales.....	123
Tabla 36. Variables seleccionadas para el estudio de sensibilidad .....	127
Tabla 37. Escenarios de evaluación en el análisis de sensibilidad .....	127
Tabla 38. Sensibilidad a la velocidad del camión de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas ..	132
Tabla 39. Sensibilidad al coste unitario del transporte por carretera de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas.....	137
Tabla 40. Sensibilidad al número máximo de grúas del transporte por carretera de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas .....	142
Tabla 41. Sensibilidad a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas .....	146
Tabla 42. Sensibilidad a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas .....	149
Tabla 43. Flotas óptimas obtenidas para las MOs norte y sur en los escenarios que implican incremento de demanda con el hub Valparaíso .....	153
Tabla 44. Flotas óptimas obtenidas para las MOs norte y sur en los escenarios que implican incremento de demanda con el hub San Antonio.....	154
Tabla 45. Sensibilidad a la demanda de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas.....	155
Tabla 46. Puertos comerciales de uso público.....	164
Tabla 47. Puertos comerciales de uso privado .....	165
Tabla 48. Mercancía de cabotaje según tipo (toneladas), 2006-2014 .....	168
Tabla 49. Contratos de concesión de la empresa portuaria de Valparaíso.....	174
Tabla 50. Contratos de concesión de la empresa portuaria de San Antonio .....	175
Tabla 51. Exportaciones e importaciones de contenedores sobre el tráfico total por puerto (%), 2006 y 2014 .....	182
Tabla 52. Distribución del tráfico por tipo de mercancía (%), 2006-2014.....	183
Tabla 53. Puestos de atraques por tipología y por puerto (número), 2014 .....	186
Tabla 54. Grúas pórtico y móviles por puerto (número), 2014.....	187
Tabla 55. Trabajadores portuarios por puerto (número), 2014 .....	188
Tabla 56. Descripción de las instalaciones portuarias .....	190
Tabla 57. Resumen de tráfico portuario (2014) .....	191
Tabla 58. Indicadores de productividad (2014).....	192
Tabla 59. Ratios financieros (descripción).....	192
Tabla 60. Ratios financieros (2015) .....	193

## Índice de figuras

Figura 1. Itinerario en la ruta.....	19
Figura 2. Contenedores importados y exportados de Chile por países.....	31
Figura 3. Movimiento de contenedores 2015.....	35
Figura 5. Grandes rutas marítimas consideradas entre Chile y el resto del mundo .....	48
Figura 6. Rutas cortas consideradas en el modelo.....	49
Figura 7. Número de líneas operativas en todas las rutas.....	55
Figura 8. Número de líneas operativas en las rutas que tocan puertos chilenos	55
Figura 9. Número y tipo de buques utilizados en todas las rutas.....	56
Figura 10. Número y tipo de buques utilizados en las rutas que tocan Chile.....	57
Figura 11. TEUs transbordados por puerto.....	58
Figura 12: Origen de los TEUs transbordados en cada puerto.....	59
Figura 13. Flujo de contenedores para el año 2015 (T), antes de la expansión del Canal de Panamá, Origen Shanghái, pre.....	60
Figura 14. Flujo de contenedores para el año 2015 (T), antes de la expansión del Canal de Panamá, todos los orígenes, pre.....	61
Figura 15. Integración de elementos en el modelo de optimización variables ...	77
Figura 16. Variables principales discretas (Elaboración Propia).....	79
Figura 17. Modelo many to many para la generación de rutas.....	80
Figura 18. Tramos de las cadenas intermodales.....	91
Figura 19. Resultados de rutas intermodales con MOs norte (Etapa 1).....	104
Figura 20. Resultados de rutas intermodales MOs sur (Etapa 1).....	105
Figura 21. Resultados de rutas intermodales con MOs norte (Etapa 2).....	108
Figura 22. Resultados de rutas intermodales con MOs sur (Etapa 2).....	108
Figura 23. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MOs norte (Escenario Actual).....	121
Figura 24. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MOs sur con San Vicente (Escenario Actual).....	122
Figura 25. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MOs sur con Coronel (Escenario Actual).....	122
Figura 26. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a la velocidad máxima del camión por carretera.....	129
Figura 27. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a la velocidad máxima del camión por carretera.....	129
Figura 28. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a la velocidad máxima del camión por carretera.....	130
Figura 29. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta al coste unitario de transporte por carretera.....	135
Figura 30. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente al coste unitario de transporte por carretera.....	136
Figura 31. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel al coste unitario de transporte por carretera.....	136
Figura 32. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta al máximo número de grúas disponibles en puerto.....	139

Figura 33. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente al máximo número de grúas disponibles en puerto.....	140
Figura 34. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel al máximo número de grúas disponibles en puerto.....	140
Figura 35. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria .....	144
Figura 36. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria .....	144
Figura 37. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria .....	145
Figura 38. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria .....	147
Figura 39. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria .....	148
Figura 40. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria .....	148
Figura 41. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a la demanda.....	151
Figura 42. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a la demanda .....	151
Figura 43. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel a la demanda.....	152
Figura 44. Importaciones e importaciones por tipo de vía (toneladas), 2006-2014 .....	166
Figura 45. Valor FOB de la las importaciones y exportaciones por tipo de vía (miles US\$), 2006-2014 .....	166
Figura 46. Mercancías manejadas según tipo (toneladas), 2006-2014.....	167
Figura 47. Mercancía manejada según tipo de tráfico (toneladas), 2006-2014.....	168
Figura 48. Contenedores manejados según tipo (toneladas), 2006-2014 .....	169
Figura 49. Contenedores manejados según tipo de tráfico (toneladas), 2006-2014 .....	170
Figura 50. Buques recalados en los puertos chilenos según tipo (número), .....	171
Figura 51. Puertos seleccionados.....	178
Figura 52. Evolución del tráfico de mercancías (toneladas), 2006-2014.....	179
Figura 53. Mercancía por puerto y tipo (toneladas), 2006-2014.....	180
Figura 54. Contenedores manejados por puerto, 2006 y 2014.....	181
Figura 55. Evolución buques recalados (número) y TRG (miles de toneladas), 2006-2014 .....	184
Figura 56. Tráfico manejado por empresa portuaria (toneladas), 2014.....	185
Figura 57. Longitud de los muelles por puerto (metros), 2014 .....	186
Figura 58. Evolución de trabajadores portuarios (número), 2006-2014 .....	189

# 1 Introducción general

Según el Fondo Monetario Internacional (FMI) la economía mundial se ha expandido en un 3,4% en el 2014. En 2015 se estima un crecimiento anual levemente superior de 3,5%. Con respecto al año próximo, el FMI eleva un poco más sus proyecciones al situar la expansión anual en un 3,8%. Por otro lado, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) predice un desarrollo económico mundial del 3,5% para el año 2015 y de 3,8% para 2016; y el Banco Mundial lo sitúa entorno al 3,0% y al 3,3%, para los respectivos años (M<sup>o</sup> de Relaciones Exteriores, 2015).

Por tanto, se estima un crecimiento moderado del comercio entre los diferentes países. Parece claro afirmar que más del 80% del comercio mundial se transporta por vía marítima y por consiguiente una creciente cantidad de mercancías pasa por los puertos de todo el mundo. El nivel de contenedorización de esta mercancía se incrementa de forma continuada. Por este motivo los países se preocupan cada vez más de tener los sistemas portuarios preparados para atender este flujo de contenedores de forma eficiente y con la capacidad adecuada.

Esta es la razón que ha motivado que Chile esté preparando su capacidad portuaria para atender el crecimiento de la demanda futura estimada en varios informes por FDC consultores (2015) <sup>1</sup>. Por este motivo se están llevando a cabo una serie de estudios que analizan los pasos a seguir en este ambiente cambiante<sup>2</sup>.

La ley de puertos en Chile establece que el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) es responsable de proponer los planes estratégicos. De esta manera el MTT asume la responsabilidad de coordinar los planes para el desarrollo a largo plazo de los puertos. Así, el MTT está desarrollando actualmente un instrumento a escala nacional de planificación portuaria: el Plan Nacional de Desarrollo Portuario (PNDP). Uno de los ejes principales de este plan es el Puerto de Gran Escala (PGE) que surge como consecuencia de la limitada capacidad de los puertos chilenos para atender el crecimiento de la demanda en la próxima década. Por tanto, la idea fundamental del PGE es hacer frente al crecimiento previsto del comercio. La ubicación propuesta para el PGE se encuentra en el centro del país, y dará servicio a las cinco regiones económicamente más activas de Chile (Michea, 2013).

Actualmente Chile Central cuenta con dos puertos de contenedores ubicados en la Región de Valparaíso, es decir, San Antonio y Valparaíso. La capacidad de

---

<sup>1</sup> Análisis de la Demanda de Largo Plazo en Puertos Estatales de la Región de Valparaíso

<sup>2</sup> Implica las variaciones a las que se tiene que someter el sector portuario como consecuencia de los cambios tecnológicos acaecidos en la industria marítima. Todo ello impulsa nuevos proyectos como el del Puerto del Gran Escala.

transferencia de contenedores disponibles en la actualidad en la región se estima 2,3 MM TEU/año, y se distribuye entre la Terminal 1 en el Puerto de Valparaíso, operado por la concesionaria TPS, y la Terminal 1 en el Puerto de San Antonio, operado por la concesionaria STI. Las autoridades portuarias, la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA) y la Empresa Portuaria Valparaíso (EPV), han ofrecido con éxito sus segundas terminales de contenedores. En 2011, EPSA adjudicó el proyecto Costanera-Espigón al concesionario Puerto Central. En 2013, EPV otorgó la Terminal 2 a la concesionaria OHL.

Con estos dos proyectos Puerto Central y Terminal 2 aumenta la capacidad portuaria instalada en poco más de 2 MM TEU/año. Además, pequeños incrementos de capacidad, proporcionados por mejoras en la infraestructura de las terminales existentes operadas por TPS y STI deben conducir a una capacidad total de aproximadamente 4,9 MM TEU/año<sup>3</sup> para el año 2021<sup>4</sup>.

En cuanto a las previsiones de la demanda, la capacidad nominal total en el sistema portuario se agotaría en el 2026<sup>5</sup>, considerando un crecimiento medio del PIB del 4%, mientras que a un ritmo de 5% este ocurriría en 2021. Por lo tanto, el MTT llegó a la conclusión de que en algún momento de la primera mitad de la década de 2020, el crecimiento de la demanda en Chile Central requeriría una capacidad adicional y por lo tanto se propone el desarrollo del PGE (Michea, 2013). Para ello, se están considerando dos alternativas: San Antonio y Valparaíso, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Localizaciones alternativas y especificaciones de los PGE**

	<b>San Antonio</b>	<b>Valparaíso</b>
Nueva capacidad	6 MM TEU/año	3 MM TEU/año
Presupuesto estimado	USD 2.700 m.	USD 1.420 m.

Fuente: Guasch et al. (2015)

La propuesta es aplicar secuencialmente dos mega-puertos, uno en cada uno de esos dos lugares. San Antonio, dadas sus características técnicas, podría concesionar mas de una terminal, mientras que Valparaíso, con un solo delantero, solo tendría capacidad para una terminal, como se muestra en la Tabla 2.

<sup>3</sup> La capacidad de 4,9 MM TEU/año, se ha ido afinando a medida que han avanzado los proyectos en cartera, actualmente los proyectos considerados llegan en total a 4.6 MM TEU/año.

<sup>4</sup> Para más información consultar Michea (2013).

<sup>5</sup> El horizonte 2021-2026 para la entrada de nueva infraestructura portuaria se posterga a la segunda mitad de la década, (2025- 2030) al utilizar las nuevas proyecciones del estudio de demanda de FDC Consultores (2015).

En cuanto a la elección entre los dos lugares identificados parece que, teniendo en cuenta las superioridades logísticas en términos de mejores enlaces intermodales (en particular del ferrocarril); el alcance de la competencia entre terminales; la mayor capacidad y las economías de escala; San Antonio podría presentar ventajas en ser el primer PGE en la región, ya que, en principio y dada todas esas características, podría prestar los servicios a un coste más bajo (Guasch et al. 2015).

**Tabla 2. Especificaciones técnicas de los PGE**

	<b>San Antonio</b>	<b>Valparaíso</b>
Máxima longitud del muelle total	3.560 m en dos frentes	1.770 m en un frente
Longitud del rompeolas	3.700 m	2.300 m
Área de copia de seguridad	170 hectáreas	44 hectáreas
Capacidad nominal	6 MM TEU/año	3 MM TEU/año

Fuente: Michea (2013)

La idea general de este informe es realizar la proyección de los servicios futuros, del tamaño de las naves que atenderán dichos servicios y la frecuencia de los mismos por destino, sobre la base de las nuevas proyecciones de carga emanadas del estudio de FDC consultores (2015). Por tanto, este informe preliminar recoge varias líneas que se insertan en los distintos capítulos de este informe y que se detallan a continuación

Capítulo 2. Análisis de la "Demanda de Largo Plazo en los Puertos Estatales de la Región de Valparaíso". Se encarga de comentar el informe de demanda llevado a cabo por FDC consultores (2015). El objetivo de este punto es realizar un análisis crítico a las proyecciones realizadas hasta ahora, indicando aquellas deficiencias metodológicas que pudieran presentar, proponer los ajustes que se deben realizar, así como los escenarios que posiblemente afecten a las proyecciones entregadas.

Capítulo 3. Estudio de planificación de las flotas que operan entre Chile y el resto del mundo. En este apartado del informe se presenta el modelo de despliegue de flotas que se ha preparado para analizar el tráfico marítimo por contenedores entre Chile y el resto del mundo. La idea final es averiguar si dado el crecimiento de los buques, que auspician las navieras es conveniente la creación de un Puerto de Gran Escala (PGE) o *hub* que centralice buena parte de la mercancía de comercio exterior de Chile. Este puerto estaría ubicado en la zona central de Chile (V región).

Capítulo 4. Modelo de identificación de Autopistas del Mar (MOs) competitivas en Chile y sus flotas óptimas. La necesidad de definir la combinación de ruta marítima y flota más adecuada en Chile para la articulación de MOs que posibiliten cadenas intermodales surge como consecuencia de la posible creación de un PGE o *hub* en la quinta región. La aparición de este gran puerto, previsiblemente centralizará el atraque de los buques de mayor porte que canalizarán en gran medida el tráfico exterior del país. Consecuentemente, será necesario tráfico marítimo de corta

distancia que, integrado con el transporte por carretera, de respuesta tanto a las necesidades del transporte de mercancía exterior desde el puerto PGE a los extremos iniciales y/o finales de las redes de transporte como al transporte interno de mercancías de Chile.

Capítulo 5. Sistema portuario chileno. Por último, esta línea de trabajo se encarga de hacer un repaso del sistema portuario chileno con la idea de analizar las capacidades y el entorno en el que se mueve la actividad portuaria chilena. La idea es investigar la necesidad de ampliación de los puertos centrales mencionados San Antonio y Valparaíso y el ajuste en capacidad del resto de los puertos para atender el tráfico que generarían las MOs.

Finalmente recalcar que los resultados de este informe sobre la oferta y demanda de servicios marítimos de línea entre Chile y el mundo deben ser tomados con cautela, dada las limitaciones de la información utilizada.

## **2 Análisis de la demanda de largo plazo en los puertos estatales de la región de Valparaíso**

### **2.1 Introducción**

El objeto de esta evaluación es revisar el contenido y la calidad del documento denominado **Informe de Avance N° 2 “Análisis de la Demanda de Largo Plazo en los Puertos Estatales de la Región de Valparaíso”** (FDC Consultores, 2015),<sup>6</sup> tanto desde el punto de vista técnico como su viabilidad práctica.

En primer lugar, presentamos los comentarios al apartado 3, que constituye la parte de series temporales. Se trata de una parte que analiza si la metodología se ha aplicado correctamente. A continuación, se presentan comentarios al trabajo que no consideran los aspectos técnicos. Finalmente hacemos un planteamiento complementario a este trabajo y unas conclusiones.

### **2.2 Comentarios sobre la metodología econométrica utilizada**

El objetivo del informe es proyectar la demanda por transferencia de carga que experimentará la zona de influencia de los puertos de la Región de Valparaíso en un horizonte de largo plazo, utilizando una metodología robusta, que actualice y complemente las estimaciones disponibles.

En lo que corresponde a la parte econométrica que abarca la sección 3, el estudio resulta interesante y además bastante completo. El informe presenta un extenso análisis aplicado para la búsqueda de diferentes modelos que permitan proyectar la demanda agregada (contenedor y fraccionada) para los puertos de la Región de Valparaíso usando tres enfoques para modelar la demanda: a) Nivel 1: demanda agregada por tipo de carga (contenedor, fraccionada); b) Nivel 2: demanda desagregada por tipo de operación (exportación, importación, etc.) y tipo de carga (contenedor, fraccionada); y c) Nivel 3: desagregación por sector productivo.

La metodología utilizada está basada en modelos de series temporales donde predomina el uso de los modelos vectoriales de corrección del error (VECM) que

---

<sup>6</sup> El documento analizado se denomina **MTT\_Análisis Demanda LP Puertos Estatales V Región\_Informe 2\_27072015\_Final\_Corregido.pdf**. Cabe destacar que también se ha analizado el contenido del documento **MTT\_Análisis Demanda LP Puertos Estatales V Región\_Informe 3.pdf**, que resulta similar al Informe de Avance N°2. Por ello, el análisis y las conclusiones pueden considerarse extensibles a ambos documentos.

permiten analizar la cointegración de varias series económicas y, por ende, estudiar conjuntamente la relación a largo plazo de las mismas.

Sin embargo, aunque el esfuerzo realizado es ímprobo a nuestro entender existen algunas dudas razonables sobre la validez de los resultados del apartado 3 que deberían ser satisfechas por los autores del informe debido a los siguientes motivos:

1) La presencia de estacionalidad en muchas series temporales que no ha sido convenientemente tratada y que podría condicionar la presencia de resultados espurios en las metodologías aplicadas.

La mayoría de las variables empleadas en los modelos presentan dos aspectos:

a) Estacionalidad trimestral (con excepción de los PIB de países extranjeros que son series desestacionalizadas y suministradas por la OCDE, véase la nota al pie de página número 14; las series de los países socios comerciales que se presentan desestacionalizadas (excepto China), véase la página 47; o la población), esto es, comportamientos periódicos relevantes durante la evolución temporal de las mismas cada cuatro periodos, tal y como puede comprobarse observando, por ejemplo, los gráficos 1, 2 y 3.

b) Es muy probable que parte de esa estacionalidad sea estocástica (no determinista) y no estacionaria, pues se observa que los periodos estacionales (picos) crecen a lo largo del tiempo.

Dicho lo anterior, y dado que no todos los datos de las variables (dependientes e independientes) han sido desestacionalizados, podrían existir algunas reservas sobre la validez de los resultados obtenidos en la modelización debido a que el análisis llevado a cabo no tiene en cuenta la existencia de la estacionalidad y algunas de sus propiedades como, por ejemplo, la no estacionariedad de la misma (es decir, la presencia de una tendencia en la parte estacional), lo que podría desvirtuar los resultados.

Aunque los ajustes estacionales de las variables son objeto de continuo debate debido a la existencia de diferentes métodos que pueden utilizarse y a las diferentes herramientas y programas informáticos que existen, se hace necesario un ajuste estacional de los datos pues éste permite, al filtrar las series de fluctuaciones periódicas y de efectos calendario, hacer que la información que aportan sea más clara y fácil de interpretar. Todo esto podría afectar, por ejemplo, a los cálculos de las elasticidades entre las transferencias de carga y el PIB, pero también a las proyecciones de la demanda.

Algunos métodos estándar son Census X-11 ARIMA o TRAMO/SEATS, entre otros.

2) Los contrastes de raíces unitarias convencionales no son suficientes para detectar el número de raíces unitarias que posee una serie temporal que presenta estacionalidad no estacionaria (es decir, tendencia en la parte estacional).

Los contrastes de raíces unitarias convencionales tipo, por ejemplo, Dickey-Fuller Aumentado (ADF) o Phillips y Perron (PP), sufrirían de una pérdida de potencia para detectar el número correcto de raíces unitarias en presencia de estacionalidad no estacionaria. Esto obligaría a usar otro tipo de contrastes que permiten detectar la existencia de raíces unitarias en la frecuencia 0 (parte regular) y también en las distintas frecuencias estacionales. Un contraste estándar para datos trimestrales es, por ejemplo, Hylleberg, Engle, Granger y Yoo (1990, HEGY). Para datos mensuales puede consultarse Franses (1990).

3) Los métodos de cointegración clásicos tampoco son suficientes para tratar las relaciones a largo plazo entre variables cuando existen raíces unitarias estacionales, dado que deberían aplicarse métodos de cointegración estacional (véase, por ejemplo, Engle, Granger, Hylleberg y Lee (1993), Franses (1991, 1996, 1998), Franses y McAleer, M. (2002), entre otros).

A continuación, y para complementar los comentarios generales que se han realizado, haremos algunos comentarios específicos que pueden ser de interés. Estos se relatan atendiendo a las páginas en las que se encuentran. Así, por ejemplo:

**Páginas 18-22.** Sería conveniente reescribir la sección 3-1-1 pues la explicación es algo confusa y contiene ciertas imprecisiones.

- En general, recomendamos estructurar convenientemente este apartado. Para ello, los autores deberían incidir en que los modelos econométricos dinámicos multiecuacionales simulan la multi-dimensionalidad de la dinámica del mercado. Entre los modelos que la literatura econométrica considera en este escenario se encuentran los modelos VARMA (Vector Autoregressive Integrated Moving Average), VARDL (Vector Autoregressive Distributed Lag), el modelo VARIMAX (Vector Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables), o el modelo VECM (Vector Error Correction Model), entre muchos otros.

- Un requisito importante en todos los modelos citados anteriormente es que las variables deben ser estacionarias, es decir, no poseer tendencias estocásticas. Pero esto debe ocurrir tanto en la parte que denominamos regular (componente tendencia-ciclo) como en la parte estacional (componente estacional). Por ello, es conveniente aplicar los filtros apropiados para eliminar ambas tendencias y hacer la serie estacionaria en media.

- La especificación econométrica dinámica utilizada en este informe para predecir los diferentes modelos usados es el VECM, cuya diferencia más relevante respecto del modelo VARIMAX, entre otras, es que se añade el error de la relación de largo plazo como regresor retardado, término que se denomina mecanismo de corrección del error.

- Esta representación puede deducirse del teorema de representación de Granger. Engle y Granger demostraron que series cointegradas tienen una representación de corrección de errores. La cointegración es una condición necesaria para que los modelos de corrección de errores existan. Los autores

hablan en ocasiones de Engel-Granger. Deberían corregir este gazapo pues aparece en varias ocasiones a lo largo del texto.

- Para determinar si un grupo de series no estacionarias están cointegradas y, si es así, determinar las ecuaciones de cointegración (el equilibrio a largo plazo), existen muchos métodos. Pero, en particular, puede utilizarse un test de cointegración sobre modelos VAR utilizando la metodología desarrollada por Johansen y Juselius (1990, 1992) y Johansen (1991), basada en sistemas cointegrados. Johansen analiza las restricciones impuestas por la cointegración de las series incluidas en un modelo VAR no restringido. Este procedimiento está basado en la estimación del sistema por máxima verosimilitud y con él puede determinarse el rango de cointegración del sistema mediante el contraste de traza o el contraste de máximo valor propio.

- Este método es el utilizado por los autores del informe para estimar y predecir la demanda (véase la sección 3-1-1.3). Los autores utilizan en la parte empírica el contraste de la traza para determinar el número de vectores de cointegración.

- Sin embargo, a nuestro entender, convendría exponer formalmente el método usado en dicho informe.

**Página 19.** Algunas dudas en esta página son las siguientes:

- ¿Es el PIB  $I(1)$ ? ¿No debería ser  $I(2)$  debido a que su tasa de crecimiento no es estacionaria (es decir,  $I(1)$ )? Por ejemplo, si el PIB es  $I(1)$ , y si además posee una raíz unitaria estacional (la parte estacional presenta tendencia creciente, como puede verse en algunos gráficos), entonces dicha serie podría tener 2 raíces unitarias en la frecuencia cero. Convendría aclarar este punto pues estos resultados podrían afectar los resultados de cointegración.

- En el test ADF, y para su estructura aumentada, se fijan 4 retardos de la variable a analizar dado que se dice que se pierden observaciones empleando más retardos. Entonces, ¿Por qué no se emplean otros contrastes como Phillips y Perron (PP) o el contraste de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) (en este último caso, la hipótesis nula es la estacionariedad, o sea la variable es  $I(0)$  frente a una alternativa no estacionaria, por ejemplo,  $I(1)$ ), pues estos pierden menos observaciones? Piénsese que el ADF sufre del problema que un número incorrecto de retardos puede hacer que el residuo de la regresión utilizada para evaluar la existencia de raíces unitarias provoque que éste no sea ruido blanco, condición ésta necesaria para usar los valores críticos tabulados por Dickey-Fuller.

**Página 25.** Varios comentarios:

- La ecuación del mecanismo de corrección del error debería escribirse correctamente, pues no se indican ni los parámetros ni las variables que están consideradas en la relación de largo plazo. ¿Por qué se incluye un error aleatorio en el lado derecho de la ecuación? Debe tenerse en cuenta que el error de la relación a largo plazo es el mecanismo de corrección de error, o sea:  $v(t) = ECT(t)$ , que a su vez debería ser  $I(0)$  si existiese cointegración.

- ¿No debería el mecanismo de corrección del error (ECT) estar retardado (rezagado) un periodo? ¿Por qué está retardado 4 periodos? Los autores aluden a que es porque los datos son trimestrales. Esta no es una justificación adecuada pues se está imponiendo que el ajuste no se hace de un trimestre a otro sino que se hace cada 4 trimestres. Este aspecto debería explicarse más convenientemente o revisarse.

**Página 26.** Varios comentarios:

- Se dice que el error de la relación a largo plazo en equilibrio es  $I(0)$ . Es cierto. Pero, ¿a qué se refieren los autores cuando dicen que en equilibrio beta traspuesto por  $\gamma(t-4)$  debe sumar cero?

- Cuando los autores describen el componente de error aleatorio de la relación de largo plazo, aluden a que si las series contenidas en el vector  $\gamma$  efectivamente cointegran, este error es esférico (y por tanto estacionario). Esta implicación no es cierta. Sin entrar en detalles formales, la esfericidad generalmente se refiere a que una variable aleatoria es homocedástica y no está autocorrelacionada (no existe correlación serial), y también suele añadirse que es estacionaria con media nula y sigue una distribución Normal. Por otro lado, un proceso estocástico es estacionario cuando la distribución de  $k$  variables aleatorias es idéntica con independencia de los valores temporales considerados. Por ejemplo, un proceso estocástico es débilmente estacionario cuando su media y varianza permanecen constantes a lo largo de tiempo. Dicho esto, por ejemplo, una variable con media nula y varianza constante a lo largo del tiempo (proceso idénticamente distribuido) puede estar autocorrelacionada en la forma de un  $ARMA(1,1)$  estacionario e invertible. O sea, no ser esférica pero sí estacionaria.

**Página 29.** En la última línea de dicha página se indica que "El siguiente gráfico muestra la evolución de la tasa de containerización en valores anuales, sin estacionalidad". Huelga decir que usando datos anuales la estacionalidad no existe en la serie temporal. En este caso, de existir un carácter periódico en la serie temporal analizada, éste solo podría ser el ciclo.

**Página 54.** ¿Por qué se estiman dos coeficientes para los ECT en la ecuación que aparece en la tabla? Si existen dos ecuaciones de cointegración, ¿Por qué se usan ambos ECT en una sola ecuación? Los autores deberían aclarar este punto.

## 2.3 Comentarios económicos sobre el informe

Como variables explicativas selecciona el PIB de China, EEUU, UE, Corea, Brasil. En algún modelo el coeficiente de China tiene signo contrario al esperado (pg 50) aunque ofrece cierta justificación. Por otro lado, contar con China en exceso es un error: "todo lo anterior redundante en la variable PIB China es la única que por sí sola

puede hacerse cargo de la fundamentación de las proyecciones futuras de la variable dependiente”.

Los modelos de exportación se basan en el VAB de cada sector, por ejemplo, minería, agropecuarios, industria de alimentación. El problema es que la demanda de exportación es, al mismo tiempo, una demanda derivada del crecimiento de otros países más que del crecimiento de la oferta exportable.

Más adelante, en la página 98 alerta sobre el estancamiento del sector del cobre: “durante los últimos años la cantidad de producto aportado por este sector ha permanecido prácticamente estancado...” al mismo tiempo que reconoce un potente desarrollo del sector servicios que lógicamente “no contribuye a la generación de bienes físicos exportables o importables que generen nuevas cargas para ser transferidas a los puertos”.

Más interesante resulta el punto 3-2-2 basado en entrevistas a expertos. Estos alertan de la posibilidad de que sea China quien desarrolle una industria asociada al cobre dado el poder monopsónico que tiene este país sobre el cobre chileno. Los otros dos sectores importantes de cara a la exportación son agricultura, que también se encuentra estancados y alimentos, que mantiene cierto potencial de crecimiento.

Las proyecciones de demanda (pg 112): propio informe alerta de lo siguiente: los dos sectores que más aportan a la exportación (agricultura y minería) parecen estancados. Por un lado, por el lado de la importación: pg. 121 “el crecimiento futuro de la economía estaría sin embargo basado en el desarrollo de sectores que no aportan carga a la exportación “como servicios financieros, servicios especializados y tecnología”.

En la parte final dedicada a las entrevistas, resulta revelador este párrafo “en el pasado se ha crecido a base de exportación fácil y sustitución fácil... exportaciones que tienden a no crecer significativamente (...) la estrategia de desarrollo vendría por el área de servicios, a la industria, principalmente internet”.

Por último, sería interesante contar con las infraestructuras de transporte que conectan los puertos y que, de alguna manera, no están presentes en el informe. Por ejemplo, Dan Shneerson (1981) en su estudio sobre los puertos nigerianos incluye también los costes del transporte por tierra. No parece que Chile pueda considerarse un *hub* de distribución de mercancías a otros lugares, dado su relativo aislamiento, con precarias comunicaciones por carretera con Argentina y Brasil y fuera de las principales rutas marítimas de distribución. Así, los puertos solo pueden usarse como infraestructura de importación e importación, pero no como paso para lugares secundarios.

## **2.4 Una propuesta alternativa. La demanda de servicios portuarios: una demanda derivada**

La demanda por servicios portuarios es una demanda derivada doblemente del "nivel de actividad económica dentro de un país y entre países" (Tongzon, 1994). Así, un cambio en el nivel de actividad económica tiene como consecuencia una modificación de la demanda de servicios portuarios. Siguiendo el eje exportación-importación tendríamos que considerar el crecimiento económico de Chile para los próximos años y el de sus principales socios comerciales.

El informe anual de comercio exterior de Chile en 2014 reconoce que China es el primer socio comercial, seguido por la Unión Europea, Estados Unidos, Japón, Mercosur, Corea del Sur, India y Perú. Muy dependiente del cobre. 37,000 millones de dólares en 2009 sobre un total de 75,000. En el mismo sentido y con datos más recientes y una metodología más sofisticada, Hausmann e Hidalgo (2014) en su libro Atlas of economic complexity analizan las relaciones comerciales de muchos países, entre ellos Chile, usando un gráfico en el que el tamaño del país es proporcional a su importancia como socio comercial. Así, podemos observar de un solo vistazo el mapa de las relaciones comerciales chilenas.

En este atlas destaca claramente la simplicidad y concentración de la oferta exportable, dependiente en un 54% del cobre, siendo el resto agropecuarios y alimentos. China se convierte en el factor clave, ya que adquiere el 26% del total de las exportaciones chilenas, sin olvidar el peso de Brasil (6%), EEUU (11%) y Corea (6.1%). Con este panorama resulta clave considerar la evolución económica de estos países y de los mercados del cobre y alimentación mundiales, para hacernos una idea de cuál puede ser el futuro de la demanda de productos exportables chilenos que, a su vez, necesiten de los servicios del puerto para su distribución mundial.

Las proyecciones del FMI para China hasta 2017 sitúan el crecimiento de este país en torno al 6-7% al año. La OCDE es un poco más pesimista pero continúa estableciendo un crecimiento por encima del 6%. En todo caso con un crecimiento cada vez más lento y más orientado hacia el consumo interno en lugar de la exportación, lo cual hace disminuir los requerimientos de materias primas para la industria. La OCDE considera que la composición del PIB chino está cambiando, perdiendo protagonismo la inversión que ya ocupa un lugar secundario en relación con un creciente consumo. El problema es que Chile exporta materias primas y alimentos, siendo el segundo grupo un bien de consumo con una baja elasticidad renta. De manera que es de esperar que China deje de ser el gran demandante de insumos procedentes de Chile.

El mismo informe no parece muy optimista para el crecimiento del agregado Latinoamericano, considerando crecimientos inferiores al 3% para el conjunto de la zona. En particular, Brasil parece estancado aunque con tendencia a recuperarse.

El FMI alerta sobre el desplome de los precios de las materias primas que han caído de forma notable desde 2011, incluyendo en esta definición a alimentación. Como se ha señalado la economía chilena es muy dependiente de la exportación de cobre, alimentos y productos agropecuarios cuyo crecimiento parece experimentar un estancamiento durante estos años. En consecuencia, deberíamos ser prudentes a la hora de considerar cualquier proyección de demanda.

Por su parte, la importación de mercancías estará en función del crecimiento económico del país. Hausmann e Hidalgo (2014) establecen un 2.8% de media de crecimiento del PIB para este país de aquí a 2020. Otras estimaciones, como las del FMI establecen tras el débil crecimiento de 2015 (1.9%) una recuperación paulatina hasta el 3.1% en 2017. En todo caso estas tasas de crecimiento son considerablemente menores que las registradas durante el boom de las materias primas y alimentos que se desencadenó durante la primera década del 2000. Por añadidura no todas estas importaciones necesitan convertirse en bienes que precisen de transporte físico.

## **2.5 Conclusiones**

En términos de la modelización econométrica, a modo de conclusión, nuestra recomendación es que los autores deberían revisar los modelos empleados en el estudio para predecir, o bien empleando datos desestacionalizados para todas aquellas variables incluidas en los modelos que tengan dicho comportamiento – comprobando que dichos datos no presentan estacionalidad residual o un excesivo suavizado de la serie para no afectar negativamente la interpretación de los datos desestacionalizados -, o bien empleando métodos de cointegración estacional si las series originales poseen estacionalidad y raíces unitarias estacionales.

Es importante remarcar que, dada la dependencia de los modelos computacionales del epígrafe 5 de los datos obtenidos en el epígrafe 3, este tema debería ser aclarado con la finalidad de evitar resultados espurios. Por ello, se hace necesario comprobar si los resultados obtenidos están distorsionados por una aplicación metodológica que no tiene en cuenta los aspectos anteriormente reseñados.

Finalmente, en cuanto a la evaluación de la demanda a largo plazo de los puertos estatales, además del presente trabajo, deberíamos considerar los siguientes puntos:

- La exportación de Chile depende demasiado del cobre y tras el boom de las materias primas y alimentación sucedido desde 2000 parece que asistimos a una ralentización de este mercado, tanto sus precios como sus demandas.
- Si consideramos los socios comerciales, la exportación chilena parece muy basculada hacia China, país que está experimentando dos cambios que no favorecen este flujo comercial: por un lado, está pasando de ser la fábrica del

mundo con un desarrollo basado en la industria y la exportación hacia una economía basada en la innovación, en bienes de consumo y en el crecimiento del consumo interno. Es de esperar que los requerimientos de cobre por unidad de PIB disminuyan en este contexto. Por otro lado, su crecimiento económico se ha atenuado.

- En el lado de la importación dependerá del crecimiento de Chile, que ha sido durante estos últimos años la mitad que en la década pasada. El cono sur está en general experimentando una ralentización de su ritmo de crecimiento. Por otro lado, los nuevos crecimientos del PIB no tienen por qué traducirse en mayores importaciones de productos –que requieran el uso del puerto- sino en servicios.
- Todo lo anterior invita a ser prudentes respecto de la futura demanda.

### **3 Estudio de planificación de las flotas que operan entre Chile y el resto del mundo**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo del informe se presenta el modelo de despliegue de flotas que se ha preparado para analizar el tráfico marítimo en contenedores entre Chile y el resto del mundo. Igualmente se introducen los indicadores que se utilizarán para resumir los resultados de la ejecución de dicho modelo.

El modelo está construido para determinar las rutas que se realizan, el número y tipo de barcos que se utilizan en dichas rutas, y la carga y descarga que se ejecuta en cada puerto, de manera que se satisfaga la demanda y se minimice el coste total de las empresas navieras. Se describe la estructura del modelo así como los parámetros que intervienen en el mismo.

Las rutas definidas son una simplificación de las existentes. Se han conservado los nodos más representativos de la región, mientras que se han agregado los situados fuera de la misma, como es el caso de Asia, Europa y los EEUU. La simulación de este tipo de tráfico con el exterior no precisa de la consideración de todos los puertos chilenos, por lo que éstos se han agrupado en uno solo localizado en la parte central del país.

Las simulaciones diseñadas parten de una cifra de movimientos de contenedores entre Chile y el resto del mundo similar a la actual (2015), para pasar a contemplar después las estimaciones de demanda disponibles para los ejercicios 2015, 2020, 2025, 2030, 2035, 2040 y 2045, en sus versiones pesimista, tendencial y optimista (tomadas del Informe de Avance Nº 2 "Análisis de la Demanda de Largo Plazo en los Puertos Estatales de la Región de Valparaíso" (FDC Consultores, 2015)). Se considera la posibilidad de utilizar hasta siete tipos de buques, con capacidades comprendidas entre 1.500 y 18.000 TEUs. También se pueden plantear dos escenarios, pre y post-expansión del Canal de Panamá, así como diferentes velocidades de crucero.

#### **3.2 Marco de referencia**

Antes de describir el modelo de despliegue de flotas, se mencionarán algunos aspectos generales del contexto en el que se plantea el problema. El marco de referencia considerado para definir este contexto se ha extraído del trabajo elaborado por Sabonge y Lugo (2014). Para configurar los elementos que intervienen en el modelo de despliegue de flotas descrito en la siguiente sección

se ha considerado la información encontrada en el trabajo mencionado, además de otras fuentes como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) , Searates, y la documentación proporcionada por el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile, entre otras.

Los servicios de transporte de carga en contenedores para la costa oeste de Suramérica se clasifican en cinco tipos: 1) Asia-Costa Oeste de Suramérica, 2) Costa Este de Estados Unidos-Costa Oeste de Suramérica, 3) Europa-Costa Oeste de Suramérica, 4) Servicio de "alimentadores" Norte-Sur en Costa Oeste, y 5) Costa Este de Suramérica-Costa Oeste de Suramérica. Para la ruta Asia-Costa Este de Estados Unidos, parte de la carga se traslada utilizando el sistema multimodal estadounidense, por medio de transporte terrestre. A partir de esta información se definieron las cinco grandes rutas consideradas en el modelo. La primera de ellas tiene inicio y final en Asia. La segunda y la cuarta rutas empiezan y terminan en la costa este y oeste de EE.UU. respectivamente. La tercera ruta se inicia y finaliza en Europa. La quinta ruta conecta las costas oeste y este de Suramérica. Estas rutas se han definido de forma que todas ellas incluyen un único puerto chileno situado en la región V (región de Valparaíso). Esta región está situada en la zona central del país y alberga dos puertos importantes en cuanto al movimiento de carga en contenedores, los puertos de San Antonio y Valparaíso. Para el año 2015, según el ranking en movimiento de carga en contenedores publicado por la CEPAL, estos puertos ocupan los dos primeros puestos en Chile. El primero, el puerto de San Antonio, es el duodécimo en América Latina y el Caribe, mientras que Valparaíso ocupa el decimoséptimo, con un movimiento de 1.170.184 y 902.542 TEUs respectivamente. A las grandes rutas se han añadido otras más cortas que resultan de particionar las ya mencionadas, además de una ruta directa que conecta Asia con Chile. Para definir las rutas se han tenido en cuenta los escenarios que parecen más realistas, planteados también en trabajos anteriores. La información sobre las distancias (en millas) entre puertos se ha tomado de Searates.com ([https://www.searates.com/es/reference/\\_portdistance/](https://www.searates.com/es/reference/_portdistance/)). El concepto de ruta utilizado en el modelo se define en la siguiente sección.

Según Sabonge y Lugo (2014), los cinco patrones de servicio mencionados se mantendrán para atender el comercio exterior de carga de contenedores de Chile con algunas modificaciones generadas por la ampliación del Canal de Panamá y la fusión de rutas. La ampliación del Canal permitirá el tránsito de buques de mayor tamaño. Respecto a la fusión de rutas, existen dos puntos de vista distintos, por un lado están los navieros que la plantean como una posibilidad y, por otro, están aquellos que la descartan al considerar que para el traslado de los productos perecederos el tiempo de transporte es esencial. Por otra parte, el uso de buques más grandes en las rutas de la costa oeste de Suramérica podría producirse también por el efecto cascada mencionado por Sánchez y Perroti (2012). Este fenómeno se produce cuando un cambio de tecnología en el comercio marítimo global que implique un aumento del tamaño de los buques, lleva a utilizar los barcos sustituidos, antes utilizados en las rutas principales, para realizar servicios en la costa oeste de América Latina. En el pasado se ha observado que los buques

que hacen las rutas más importantes son significativamente mayores que los empleados en las costas de Suramérica, existiendo un retraso en la incorporación de barcos más grandes en esta región respecto a otras rutas de mayor relevancia comercial, si bien este retraso parece haberse reducido en los últimos años (con datos anteriores al año 2012).

Con datos de finales de 2014, Sabonge y Lugo (2014) estiman que el número de buques utilizados para realizar los servicios que atiende el mercado de la costa oeste de América del Sur son 136, con una capacidad nominal de 69.267 TEUs semanales, correspondiendo a Chile una cantidad aproximada del 50% de la capacidad nominal total. El transporte del comercio exterior chileno en buques portacontenedores lo realizan dieciocho servicios de línea a través de nueve puertos de Chile. La mayoría de estos dieciocho servicios tienen un promedio de 2.72 puertos chilenos en su recorrido, en ocasiones recalán en un puerto dos veces, en dirección sur para entregar carga y en dirección norte para recogerla. Solamente dos servicios recalán en un único puerto chileno.

Esta práctica de recalada doble es ineficiente para buques Pospanamax y conlleva unos costes adicionales que son trasladados al embarcador, lo que ha provocado que las navieras reclamen una mayor flexibilidad en la normativa que regula el cabotaje. Algunas de las condiciones que favorecen esta práctica de recalada en el transporte marítimo del comercio exterior de Chile son las carencias de equipamiento adecuado en los puertos, problemas relativos a las operaciones de estiba, y la posibilidad de que el transporte de la mercancía se realice en menos tiempo, esto último es de mayor relevancia cuando se trata de bienes perecederos. En contraposición con esta práctica, la tendencia cuando se utiliza un buque grande es reducir el número de puertos de recalada. Este hecho podría favorecer el uso de puertos *hub* si se opta por barcos de gran tamaño.

En el modelo utilizado, se han considerado hasta seis tipos de buques, con capacidades de 1.500, 3.000, 5.000, 7.000, 9.000, 13.000 y 18.000 TEUs. Las limitaciones de tránsito para los distintos tipos de barco se incorporan en el modelo matemático en forma de restricciones. Parte de estas limitaciones desaparecen con la ampliación del Canal de Panamá ya que, como se ha dicho anteriormente, dicha ampliación permite el tránsito por el mismo de barcos más grandes.

Los servicios se han supuesto semanales ya que en la práctica ésta es la frecuencia habitual. De hecho, de acuerdo con los datos presentados en Sabonge y Lugo (2014), extraídos de Blue Waters, de los dieciocho servicios de línea de carga en contenedores que transportan el comercio exterior de Chile, aproximadamente el 78% de ellos tiene una frecuencia semanal. Solamente cuatro servicios no se ajustan a esta dinámica: dos servicios realizados en buques multipropósito, un servicio alimentador con origen en Panamá y un servicio que atiende el Mediterráneo. Estos servicios no semanales tienen una frecuencia superior a una semana (entre 9 y 17 días) y utilizan buques con tamaño promedio inferior a 2000 TEUs de capacidad nominal. La Tabla 3 muestra las frecuencias y tamaños de

buque correspondientes al año 2014 tomados del trabajo de Sabonge y Lugo (2014).

**Tabla 3. Frecuencias de servicio y tamaños de buque (año 2014)**

<b>Frecuencias y tamaños 2014</b>			
<b>Patrón de servicio</b>	<b>Número de servicios</b>	<b>Rango tamaño buque TEUs</b>	<b>Frecuencia</b>
Asia-costa oeste de Suramérica	6	5.447 a 9.200	Semanal
Costa este de Norteamérica- costa oeste de Suramérica	3	1.300 a 4.600	Semanal
Golfo de México- costa oeste de Suramérica	1	Buque multipropósito Tamaño promedio 1.381	Cada dos semanas
Europa- costa oeste de Suramérica	1	1.000 a 5.301	Semanal
Mediterráneo- costa oeste de Suramérica	3	1728 a 1.730	Cada dos semanas
Intrarregionales	1	1.180 a 3.649	7 a 9 días

Fuente: Sabonge y Lugo (2014)

Los costes que intervienen en el modelo (costes operativos del buque, costes de carga, descarga y transbordo, costes asociados al paso por el Canal de Panamá, etc.), así como el resto de los principales datos utilizados en el modelo, son descritos en la sección 3.4.

Con la aplicación del modelo de despliegue de rutas se analizan diversos escenarios. De manera que se hacen variar las condiciones de demanda, tránsito, costes, y puertos, entre otras, y se obtienen conclusiones que puedan ser contrastadas con las de otros estudios previos, en relación a la puesta en funcionamiento de un puerto de gran escala en la costa chilena.

Se ha diseñado el conjunto de simulaciones considerando valores de la demanda para los siete años mencionados en la sección anterior y tres tendencias (pesimista, optimista y tendencial) contemplados en las estimaciones de la evolución de la demanda facilitadas por el Ministerio de Transporte del Gobierno de Chile. Igualmente se podrán considerar diferentes valores de la velocidad del buque así como las situaciones anterior y posterior a la ampliación del Canal de Panamá tanto en términos de capacidad como de tarifas.

### 3.3 El modelo

El modelo matemático utilizado como referencia para la planificación de las rutas marítimas es una adaptación del propuesto por Wang y Meng (2012). Este modelo está enfocado en la determinación de flotas óptimas, donde el objetivo es minimizar el coste total para la compañía de transporte marítimo, incorporando operaciones de transbordo de mercancías. Se trata de determinar el número de barcos de cada tipo que realizan las rutas, y las operaciones de carga y descarga que llevan a cabo, de manera que se satisfaga la demanda existente con el coste mínimo. Este modelo se ha aplicado utilizando el software proporcionado por GAMS y CPLEX.

La notación, las hipótesis y el problema se describen en los apartados siguientes.

#### 3.3.1 Definición de las rutas

Se considera una compañía de transporte marítimo de contenedores que opera un conjunto de rutas representado por  $R$ . Cada elemento de este conjunto  $R$  es una ruta  $r$ . Estas rutas incluyen un conjunto de puertos  $P$ .

Una ruta  $r \in R$  está definida como una secuencia de puertos donde el puerto inicial y el final coinciden. Esta rotación de puertos puede expresarse de la forma siguiente:

$$p_{r1} \rightarrow p_{r2} \rightarrow \dots \rightarrow p_{rN_r} \rightarrow p_{r1}$$

donde:

$N_r$  es el número de puertos en la ruta (se excluye el último puerto  $p_{r,N_r+1} = p_{r1}$ )

$p_{ri}$  es el  $i$ -ésimo puerto visitado en la ruta ( $r = 1, 2 \dots N_r$ )

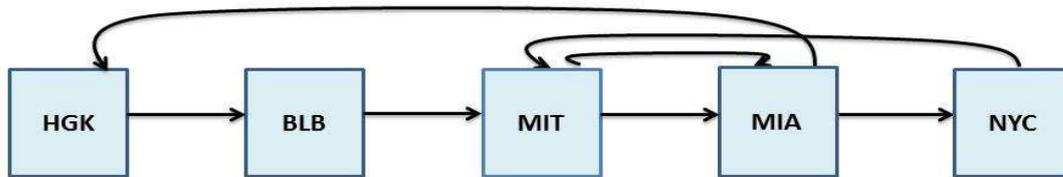
$I_r = \{1, 2 \dots N_r\}$  es el conjunto de índices de los puertos en la ruta  $r$ .

Cada ruta  $r \in R$  tiene una frecuencia de servicio semanal. Un puerto puede ser visitado más de una vez en una ruta, en este caso ese puerto tendrá asignados más de un índice en esa ruta. El conjunto  $I_{rp} \subset I_r$  representa el conjunto de índices asociados al puerto  $p \in P$  en la ruta  $r \in R$ . El viaje desde el puerto  $p_{ri}$  hasta el puerto  $p_{r,i+1}$  es representado por el arco  $i$  de la ruta  $r$ , definido por el par de puertos ordenados  $(p_{ri}, p_{r,i+1})$  siendo  $p_{rN_r+1} = p_{r1}$ .

Por ejemplo, la ruta Hong Kong (HGK), Balboa (BLB), Manzanillo (MIT), Miami (MIA), New York (NYC), Manzanillo (MIT), Miami (MIA), Hong Kong (HGK) está representada por la secuencia siguiente y la Figura 1 :

$p_{r1}(HGK) \rightarrow p_{r2}(BLB) \rightarrow p_{r3}(MIT) \rightarrow p_{r4}(MIA) \rightarrow p_{r5}(NYC) \rightarrow p_{r6}(MIT) \rightarrow p_{r7}(MIA) \rightarrow p_{r8}(HGK)$

**Figura 1. Itinerario en la ruta**



Para esta ruta  $N_r = 7$ . Los puertos Manzanillo y Miami son visitados dos veces y el conjunto de índices asociados a estos puertos para esta ruta son  $I_{r,MIT} = \{3,6\}$  y  $I_{r,MIA} = \{4,7\}$ , respectivamente.

En el modelo existen rutas iguales, es decir, algunos índices  $r$  diferentes definen la misma secuencia de puertos. Se han definido así para garantizar la cantidad suficiente de servicios que permite satisfacer la demanda, de manera que para cada ruta (secuencia de puertos) existe la posibilidad de tener varias líneas.

### 3.3.2 El problema de despliegue de flotas

Se considera que una ruta (línea)  $r \in R$  puede ser realizada por varios tipos de barco  $v \in \vartheta$ . Podrían existir restricciones que imposibiliten la realización de algunas rutas por determinados tipos de barco. Se denota  $\vartheta_r \subset \vartheta$  al conjunto de tipos de barco que pueden realizar la ruta  $r \in R$ .

La demanda semanal entre cada par de puertos origen  $o \in P$  y destino  $d \in P$  está representada por  $d_{od}$ . Los costes (USD/TEU) asociados al transporte de un contenedor a su paso por el puerto  $p \in P$  en una ruta  $r \in R$  que incluye dicho puerto, son los siguientes: el coste de transbordo,  $\bar{c}_p$ , el coste de carga,  $\hat{c}_p$ , y el coste de descarga,  $\tilde{c}_p$ . La capacidad máxima (en TEUs) de un barco tipo  $v \in \vartheta$  se denota  $Cap_v$ .

Se denota con  $m_{rv}$  al número de barcos de tipo  $v \in \vartheta$  que realizan la ruta  $r \in R$ . El coste total de ejecutar la ruta es la suma de los costes propios de los barcos empleados, los costes relacionados con el viaje, y los costes de atraque.

Para cada tipo de barco  $v \in \vartheta$  se definen los parámetros siguientes:

$c_v^{opr}$ : coste fijo de operación semanal, incluyendo costes de tripulación, mantenimiento, seguros, almacenes, amortización, etc.

$c_{p_{ri}v}^{ber}$ : coste de ocupación de muelle (atraque) (USD/h) en el  $i$ -ésimo puerto de la ruta  $r \in R$  para un barco de tipo  $v$ .

$\tau_{rv}^{fix}$ : tiempo de navegación (h) en la ruta  $r \in R$  para un barco de tipo  $v$ , a una velocidad especificada. Incluye el tiempo de pilotaje en puertos, el cual se considera igual a 4 horas para todos los puertos excepto para los del Canal de Panamá donde se supone un tiempo igual a 24 horas.

$t_{p_{ri}v}$ : tiempo medio de manipulación de un contenedor (h/TEU) en el puerto  $p_{ri}$

El coste relacionado con el barco viene dado por  $m_{rv}c_v^{opr}$  (USD/semana). El coste asociado al viaje, incluyendo tasas de puerto, cuotas, repostaje (bunkering), coste de llamada a puerto, etc., está representado por  $c_{rv}^{fix}$  (USD/semana). Los costes de atraque vienen dados por las tasas de atraque por hora para los diferentes tipos de barco en cada puerto. En este trabajo se consideran los costes de capital fijo a través de la incorporación de los gastos de amortización en los costes operativos de los buques.

A los costes anteriores se les tiene que añadir los costes asociados al paso por el Canal de Panamá. Ello se hace asignando un coste en el nodo  $i$  de la ruta  $r$  donde  $i$  se corresponde con el puerto de entrada en el Canal, para el resto de los casos este coste es cero. Los costes de paso por el Canal de Panamá son de dos tipos, unos dependen únicamente del tipo de barco y otros dependen también de la carga transportada:

$c_{ri}^{canalv}$ : coste de paso por el Canal para un barco de tipo  $v$ , aplicado en el puerto  $i$ -ésimo en la ruta  $r$ , siendo este puerto uno de los puertos de entrada o de salida del Canal (aquí este coste se ha aplicado en el puerto de entrada, para el resto de los índices  $i$  a este parámetro se le asigna el valor cero).

$c_{ri}^{canalc}$ : coste de paso por el Canal para un barco de tipo  $v$  por unidad (TEU) de carga transportada, aplicado en el puerto  $i$ -ésimo en la ruta  $r$ , siendo este puerto uno de los puertos de entrada o de salida del Canal (aquí este coste se ha aplicado en el puerto de entrada, para el resto de los índices  $i$  a este parámetro se le asigna el valor cero).

El problema consiste en determinar los barcos de cada tipo que realizan cada ruta, así como las cantidades cargadas y descargadas en cada puerto, de manera que se satisfaga la demanda y el coste total sea mínimo.

### 3.3.3 La función objetivo

El vector de variables de decisión es

$$\mathbf{x} = (x_{rv}, \hat{z}_{ri}^0, \tilde{z}_{ri}^0, f_{riv}^0, m_{rv}, z_{riv}) \text{ con } r \in R, v \in \Theta_r, i \in I_r, o \in P, d \in P, o \neq d$$

donde las variables de decisión del problema son las siguientes:

$x_{rv}$ : variable binaria que toma el valor 1 si un barco de tipo  $v$ , con  $v \in \Theta_r$ , hace la ruta  $r \in R$  y toma el valor 0 en otro caso.

$\hat{z}_{ri}^o$ : número de contenedores (TEUs/semana) con origen en el puerto  $o \in P$  que son cargados en el puerto  $i$ -ésimo de la ruta  $r \in R$ .

$\tilde{z}_{ri}^o$ : número de contenedores (TEUs/semana) con origen en el puerto  $o \in P$  que son descargados en el puerto  $i$ -ésimo de la ruta  $r \in R$ .

$f_{riv}^o$ : número de contenedores (TEUs/semana) con origen en el puerto  $o \in P$  que son estibados a bordo de los barcos tipo  $v$  en el arco  $i$ -ésimo de la ruta  $r \in R$ .

$m_{rv}$ : número de barcos de tipo  $v \in \Theta_r$  que hacen la ruta  $r \in R$ .

$z_{riv}$ : número total de contenedores manejados (cargados y descargados) en el puerto  $i$ -ésimo de la ruta  $r$  para un barco de tipo  $v$ .

El número de barcos que realizan la ruta  $r \in R$  se denota  $m_r$  y se obtiene sumando los valores de  $m_{rv}$  para los distintos valores de  $v$ , una vez obtenidos estos valores.

Para cada puerto  $p \in P$  se define  $R_p \subseteq R$  como el conjunto de rutas que contienen el puerto  $p$ .

Se define el conjunto  $I_{rc}$  como el conjunto de índices en  $I_r$  correspondientes al primer puerto en la ruta antes del tránsito por el Canal de Panamá, para las rutas que incluyen dicho tránsito. Los costes asociados al tránsito por el Canal vienen dados por la tarifa  $c_{riv}^{canal^c}$  aplicada a los contenedores (TEUs) cargados a bordo del barco de tipo  $v$  durante el tránsito, y la tarifa  $c_{riv}^{canal^v}$  que se aplica a los barcos de acuerdo a su capacidad (TEUs).

El coste semanal total si la compañía marítima utiliza  $m_{rv}$  barcos de tipo  $v \in \Theta$  para satisfacer la demanda semanal  $d_{od}$ , es denotado por  $TC(\mathbf{x})$  y viene dado por la expresión siguiente:

$$\begin{aligned}
TC(\mathbf{x}) = & \sum_{r \in R} \sum_{v \in \vartheta_r} (m_{rv} c_v^{opr} + c_{rv}^{fix} x_{rv}) + \sum_{r \in R} \sum_{i \in I_r} \sum_{v \in \vartheta_r} c_{p_{ri}v}^{ber} t_{p_{ri}v} z_{riv} \\
& + \frac{1}{2} \sum_{p \in P} \bar{c}_p \left[ \sum_{r \in R_p} \sum_{i \in I_{rp}} \sum_{o \in P} (\hat{z}_{ri}^o + \tilde{z}_{ri}^o) - \sum_{d \in P} d_{pd} - \sum_{o \in P} d_{op} \right] \\
& + \sum_{o \in P} \sum_{d \in P} (\hat{c}_o + \tilde{c}_d) d_{od} + \sum_{r \in R} \sum_{i \in I_{rc}} \sum_{v \in \vartheta_r} \sum_{o \in P} c_{riv}^{canalc} f_{riv}^o + \sum_{r \in R} \sum_{v \in \vartheta_r} \sum_{i \in I_{rc}} c_{riv}^{canalv} x_{rv}.
\end{aligned}$$

Los seis sumandos en la expresión anterior se corresponden, respectivamente, con:

1. Costes de operación relativos a los barcos y a los viajes en las diferentes rutas.
2. Costes de atraque.
3. Costes de transbordo de los diferentes barcos en las rutas que realizan.
4. Costes asociados con la carga y descarga de los contenedores.
5. Costes por carga y tipo de barco asociados al paso por el Canal de Panamá.
6. Costes por tipo de barco asociados al paso por el Canal de Panamá.

### 3.3.4 Las restricciones

Para cada  $v \in \vartheta$  se define  $R_v \subseteq R$  como el conjunto de rutas compatibles con el tipo de barco  $v$ , es decir:

$$R_v = \{r | r \in R, v \in \vartheta_r\}$$

Las restricciones del problema de minimización de costes son las siguientes:

$$\sum_{v \in V_r} x_{rv} = 1 \quad \forall r \in R$$

$$m_{rv} \leq M_1 x_{rv} \quad \forall r \in R, \forall v \in \vartheta_r$$

$$168m_{rv} + M_2(1 - x_{rv}) \geq \tau_{rv}^{fix} + \sum_{i \in I_r} t_{p_{ri}v} z_{riv} \quad \forall r \in R, \forall v \in \vartheta_r$$

$$\sum_{o \in P} f_{riv}^o \leq Cap_v x_{rv} \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \vartheta_r$$

$$\sum_{v \in \vartheta_r} f_{r,i-1,v}^o + \hat{z}_{ri}^o = \sum_{v \in \vartheta_r} f_{r,i,v}^o + \tilde{z}_{ri}^o \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall o \in P$$

$$\sum_{r \in R_d} \sum_{i \in I_{rd}} (\hat{z}_{ri}^o - \tilde{z}_{ri}^o) = d_{od} \quad \forall o, d \in P, \quad o \neq d$$

$$z_{riv} \leq M_3 x_{rv} \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \mathcal{V}_r$$

$$z_{riv} + M_4(1 - x_{rv}) \geq \sum_{o \in P} (\hat{z}_{ri}^o + \tilde{z}_{ri}^o) \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \mathcal{V}_r$$

$$f_{riv}^o = 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \mathcal{V}_r, o = p_{r,i+1}$$

$$\tilde{z}_{ri}^o = 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, o = p_{ri}$$

$$x_{rv} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, \forall v \in \mathcal{V}$$

$$m_{rv} \in Z^+ \cup \{0\} \quad \forall r \in R, \forall v \in \mathcal{V}$$

$$\hat{z}_{ri}^o, \tilde{z}_{ri}^o \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall o \in P$$

$$f_{riv}^o \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \mathcal{V}, \forall o \in P$$

$$z_{riv} \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \mathcal{V}_r$$

Estas restricciones se interpretan de la siguiente forma:

Las restricciones

$$\sum_{v \in \mathcal{V}_r} x_{rv} = 1 \quad \forall r \in R$$

indican que una ruta es realizada por un único tipo de barco.

Obsérvese que estas restricciones fuerzan a que toda ruta (línea)  $r$  sea realizada, lo cual no necesariamente tiene que ser así en cada uno de los casos. En este punto conviene hacer algunas aclaraciones sobre la forma en que se ha modelizado el problema. Como ya se mencionó anteriormente, para cada ruta se han considerado varias líneas, de manera que el número de líneas permita satisfacer la demanda total. En el modelo, cada valor del índice  $r$  estaría asociado a una línea. Puede ocurrir que algunas de estas líneas no sean necesarias para servir la demanda, por lo que no debería ser operada por un barco pues lo contrario supondría un coste. Por otro lado, no operar una línea entra en conflicto con la restricción correspondiente a dicha línea, que obliga a que todas sean utilizadas. Para evitar este problema de factibilidad se ha definido un tipo de barco *ficticio* con costes asociados nulos que son los que operarían estas líneas sobrantes, con lo que los costes operativos totales no se verían afectados. Podría plantearse una formulación alternativa sustituyendo estas ecuaciones por las restricciones  $\sum_{v \in \mathcal{V}_r} x_{rv} \leq 1, \forall r \in R$  y eliminar el barco ficticio.

Por otro lado, como no se conoce a priori el número de líneas que se utilizan en la solución óptima, para cada ruta, se ha considerado un número de líneas que garantice la factibilidad del problema y permita la obtención de buenas soluciones.

Las restricciones

$$m_{rv} \leq M_1 x_{rv} \quad \forall r \in R, \forall v \in \vartheta_r$$

imponen que si  $x_{rv} = 0$  entonces  $m_{rv} = 0$ . Es decir, si la ruta  $r$  no es realizada por el tipo de barco  $v$ , el número de barcos de este tipo empleados en esta ruta es cero. Aquí  $M_1$  representa una cota superior del número de barcos de tipo  $v$  que pueden hacer la ruta  $r$ .

Las restricciones

$$168m_{rv} + M_2(1 - x_{rv}) \geq \tau_{rv}^{fix} + \sum_{i \in I_r} t_{p_{riv}} z_{riv} \quad \forall r \in R, \forall v \in \vartheta_r$$

están relacionadas con la frecuencia semanal del servicio. Se introducen para garantizar que el número de barcos empleados de cada tipo es suficiente para hacer los servicios semanales requeridos. El valor de  $M_2$  se elige de forma que cuando  $x_{rv} = 0$  se obtenga una ecuación redundante.

Considerando que cualquiera de las rutas contempladas en el modelo requiere como máximo 15 semanas y que una semana tiene 168 horas, puede tomarse  $M_1=15$  y  $M_2=15 \times 168=2.520$  h/semana. Si el análisis incluyese alguna ruta que requiriera más tiempo, estas cotas se modificarían asignándoseles un valor mayor.

Las restricciones

$$\sum_{o \in P} f_{riv}^o \leq Cap_v x_{rv} \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \vartheta_r$$

son restricciones de capacidad. Garantizan que la cantidad transportada por cada arco de una ruta no supere la capacidad del tipo de barco empleado en esa ruta.

Las restricciones

$$\sum_{v \in \vartheta_r} f_{r,i-1,v}^o + \hat{z}_{ri}^o = \sum_{v \in \vartheta_r} f_{riv}^o + \hat{z}_{ri}^o \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall o \in P$$

$$\sum_{r \in R_d} \sum_{i \in I_{rd}} (\hat{z}_{ri}^o - \hat{z}_{ri}^o) = d_{od} \quad \forall o, d \in P, \quad o \neq d$$

son las restricciones de conservación del flujo. Imponen que la cantidad transportada en el arco  $i-1$  de la ruta más la cantidad cargada en el puerto  $i$  menos la cantidad descargada en este puerto sea igual a la cantidad transportada en el arco  $i$ .

Las restricciones

$$z_{riv} \leq M_3 x_{rv} \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \vartheta_r$$

$$z_{riv} + M_4(1 - x_{rv}) \geq \sum_{o \in P} (\hat{z}_{ri}^o + \tilde{z}_{ri}^o) \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \vartheta_r$$

representan la definición de las variables  $z_{riv}$ . Aquí  $M_3$  representa una cota superior del valor de las variables  $z_{riv}$ , y  $M_4$  es una cota superior del sumatorio  $\sum_{o \in P} (\hat{z}_{ri}^o + \tilde{z}_{ri}^o)$ . Podría tomarse  $M_3 = M_4 = 2 \times \max\{Cap_v : v \in V\}$ .

Las restricciones

$$f_{riv}^o = 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall v \in \vartheta, o = p_{r,i+1}$$

imponen que los contenedores con origen en el puerto  $o$  no vuelvan a este puerto.

Las restricciones

$$\tilde{z}_{ri}^o = 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, o = p_{ri}$$

imponen que los contenedores con puerto de origen  $o$  no sean descargados en este mismo puerto.

El resto de las restricciones indican el dominio de las variables de decisión del problema.

De este modo, el problema de optimización resultante es un problema de programación lineal entero mixto.

### 3.3.5 Corrección de la solución obtenida

La aplicación del modelo descrito en el apartado anterior puede dar lugar a soluciones donde la carga no se deposite en el puerto de destino cuando el buque recalca en ese puerto por primera vez en su recorrido. Para evitar esta situación se incorpora una segunda etapa en el proceso de solución, la cual se describe a continuación.

Una vez resuelto el problema de optimización en la primera etapa, se consideran los valores óptimos obtenidos para las variables  $\hat{z}_{ri}^o, \tilde{z}_{ri}^o$ . Estos valores son representados con la notación  $\hat{z}_{ri}^{*o}, \tilde{z}_{ri}^{*o}$ . Se definen unos parámetros,  $\widehat{z}_{pr}^o$  y  $\widetilde{z}_{pr}^o$ ,  $\forall r \in R, \forall o, p \in P$ , cuyo valor representa la carga y descarga con origen en  $o$  en el puerto  $p$  y en la ruta  $r$ . Es decir,

$$\widehat{z}_{pr}^o = \sum_{i \in I_{rp}} \hat{z}_{ri}^{*o}$$

$$\widetilde{z}_{pr}^o = \sum_{i \in I_{rp}} \widetilde{z}_{ri}^{*o}.$$

Se define también el conjunto de índices  $I_f = \{(o, r, i, v) / f_{riv}^o \neq 0\}$ , siendo  $f_{riv}^o$  los valores de los flujos para la solución obtenida en la primera etapa.

Ahora, considerando de nuevo las variables  $\hat{z}_{ri}^o$ ,  $\widetilde{z}_{ri}^o$  y  $f_{riv}^o$ , para  $r \in R, i \in I_r, o \in P, v \in \vartheta_r$ , definidas en la sección anterior, se resuelve el problema:

$$\min \sum_{(o,r,i,v) \in I_f} f_{riv}^o$$

$$\sum_{v \in \vartheta_r} f_{r,i-1,v}^o + \hat{z}_{ri}^o = \sum_{v \in \vartheta_r} f_{r,i,v}^o + \widetilde{z}_{ri}^o \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall o \in P$$

$$\widehat{z}_{pr}^o = \sum_{i \in I_{rp}} \hat{z}_{ri}^o \quad \forall r \in R, \forall o, p \in P$$

$$\widetilde{z}_{pr}^o = \sum_{i \in I_{rp}} \widetilde{z}_{ri}^o \quad \forall r \in R, \forall o, p \in P$$

$$f_{riv}^o = 0 \quad \forall (o, r, i, v) \text{ no perteneciente a } I_f$$

$$f_{riv}^o \geq 0 \quad \forall (o, r, i, v) \in I_f$$

$$\widetilde{z}_{ri}^o = 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, o = p_{ri}$$

$$\hat{z}_{ri}^o, \widetilde{z}_{ri}^o \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall i \in I_r, \forall o \in P.$$

En este problema el objetivo es minimizar el flujo total transportado por los arcos de ruta. El primer grupo de restricciones son las condiciones de conservación del flujo. El segundo y tercer grupo de restricciones fijan la carga y descarga total en los puertos  $p$  que intervienen en cada ruta  $r$ . Para cada ruta  $r$  y puerto  $p$ , esta carga (descarga) total se obtiene sumando los valores de las cargas (descargas) para los nodos  $i$  que coinciden con el puerto  $p$  en la ruta  $r$ , tomando estos valores de la solución obtenida en la primera etapa del proceso de resolución. El cuarto grupo de restricciones fija los flujos que deben ser cero, los mismos que son nulos en la solución de la primera etapa. El quinto grupo de restricciones son las condiciones de no negatividad para las variables  $f_{riv}^o$ . Finalmente, las dos últimas restricciones ya estaban en el problema resuelto en la primera etapa y tienen el significado ya descrito en la sección anterior. Obsérvese que los valores óptimos de la carga y descarga en los puertos, así como de la función objetivo (función de

costes), obtenidos en la primera etapa del proceso de resolución, no se modifican en la segunda etapa.

### 3.3.6 Observaciones sobre el procedimiento de solución

Para resolver el problema de optimización formulado en las secciones anteriores se ha construido un programa en lenguaje Gams y se ha utilizado el software Cplex en una máquina virtual de 10 procesadores Intel® Xeon® E620 (2.4 GHz) y 5,00 GB de RAM.

Dado el elevado número de variables y restricciones del problema, su resolución tiene un coste computacional elevado, principalmente en la primera etapa del proceso. Con el fin de reducir el tiempo de computación se han tenido en cuenta varias estrategias, lo cual permite obtener soluciones en un tiempo razonable pero sin garantizar su optimalidad. Estas estrategias han sido las siguientes: 1) reducir el número de casos en las simulaciones, conservando las que se han considerado que pueden proporcionar información de mayor interés y que cubren, de alguna forma, el abanico de simulaciones proyectadas inicialmente; 2) aprovechar la información aportada por la solución del problema continuo, con el fin de eliminar variables *no prometedoras* en la solución del problema entero mixto, y 3) relajar el margen de error fijado como una opción en el Cplex. Este margen de error viene dado por el valor asignado al parámetro *optcr* y representa la diferencia relativa entre el valor objetivo de la mejor solución factible encontrada y una cota inferior (si se trata de un problema de minimización) del valor objetivo óptimo. Cuando el valor de esta diferencia es menor que el asignado al parámetro, el proceso de resolución se detiene. En Cplex, el parámetro *optcr* se define como  $optcr = \left| \frac{BP-BF}{BF+10^{-10}} \right|$ , donde BP (best possible) denota una cota (inferior si se está minimizando y superior si se está maximizando) del valor objetivo óptimo, y BF (best found) representa el mejor valor objetivo de una solución factible ya encontrada. También se incluyó una orden de parada si la duración de la ejecución superaba un valor preestablecido.

## 3.4 Principales datos utilizados en el modelo

### 3.4.1 Base de datos de comercio exterior

Este apartado muestra como se han obtenido los datos de contenedores (TEUs) exportados e importados por los seis países latinoamericanos considerados (México, Panamá, Colombia, Ecuador, Perú y Chile), distinguiendo entre las siguientes regiones/países: México, Panamá, Colombia, Ecuador, Perú, Chile, Argentina, Brasil, Hong Kong, Corea del Sur, Japón, Taiwán, China, resto de Asia, Estados Unidos de América (diferenciando entre la costa este y oeste), Europa y

el resto del mundo. Para tal fin, se ha hecho uso de tres fuentes de datos. Las dos primeras fueron obtenidas de la CEPAL mientras que la tercera se obtuvo del "United States Census Bureau".

La CEPAL dispone de datos de comercio internacional contenedorizado<sup>7</sup>: exportaciones e importaciones en TEUs, por año, distinguiendo por países en el caso de América Latina y el Caribe, y por regiones para el resto del mundo (Asia, India y Medio Oriente, el Mediterráneo y el mar Negro; el norte de Europa; África y Norte América, incluyendo Estados Unidos de América y Canadá). La Tabla 4 muestra los datos de contenedores comercializados por regiones para Chile en 2015. Como se aprecia en dicha tabla, los datos vienen clasificados por regiones y no por países.

Por otro lado, la CEPAL, provee también del dato de movimiento de contenedores (TEUs) para cada país de Latinoamérica y Caribe pero sin distinguir entre destinos como sí hace la base de datos anterior<sup>8</sup>. Como cabría esperar, el dato de movimiento de contenedores es superior al del comercio de los mismos. Así, para 2014<sup>9</sup>, en Chile se movieron 3.951.720 TEUs, mientras que el comercio de contenedores ascendió a 1.660.876 TEUs. Esto supone un movimiento de contenedores de 2,3 veces superior al de comercio de los mismos. Diferencias similares se obtienen para el resto de países, salvo para el caso de Panamá donde las diferencias son alrededor de 30 veces superior. La preponderancia de Panamá como puerto de entrada y salida mundial de contenedores (transbordo de mercancías) está detrás de estas diferencias tan alejadas del resto de puertos latinoamericanos.

Para controlar por este efecto se multiplicó el dato de comercio de 2015 por un factor de corrección que no es sino el cociente entre el dato de movimiento y el de comercio para el año 2014. Para el caso de Panamá, sin embargo, se optó por usar como factor de corrección la media del resto de puertos (2,35), en vez de su factor de corrección correspondiente. Esta decisión se debe a que, dada la información disponible, no es posible corregir el dato de movimiento de contenedores de Panamá por el dato de contenedores transbordados y que está en la raíz de las diferencias entre contenedores comercializados y movidos. De esta forma, la Tabla 4 pasa a ser la Tabla 5.

Con el fin de repartir los contenedores por regiones (Tabla 5) entre los países de interés anteriormente señalados, se hizo uso de los datos de comercio internacional proporcionados por la CEPAL<sup>10</sup>. Estos datos muestran las exportaciones e importaciones por tipo de bienes y por países tanto en unidades monetarias (dólares) como en volúmenes (toneladas) siendo 2011 el año más

---

<sup>7</sup> <http://interwp.cepal.org/sisgen/ConsultaIntegrada.asp?idIndicador=1136&idioma=e>

<sup>8</sup> <http://interwp.cepal.org/sisgen/ConsultaIntegrada.asp?idIndicador=1044&idioma=e>

<sup>9</sup> Año más reciente para el movimiento de contenedores.

<sup>10</sup> <http://interwp.cepal.org/badecel/basededatos.asp>

reciente del que se disponía de datos<sup>11</sup>. Estos datos de comercio internacional no distinguen entre volúmenes contenedorizados sino entre tipos de bienes.

Así pues, el flujo de contenedores por región se repartió teniendo en cuenta la proporción de importaciones y exportaciones para los diferentes países obtenida de los datos generales de comercio exterior (cantidades comercializadas) de la CEPAL. Es decir, por ejemplo, el flujo de exportaciones de Chile hacia Asia en 2011 ascendió a 27 millones de toneladas aproximadamente, mientras que el flujo de exportaciones de Chile a China para ese mismo año ascendió a unos 13 millones de toneladas aproximadamente. Así pues, la proporción de exportaciones chilenas a China supone alrededor de un 50% del total de exportaciones de Chile a Asia.

**Tabla 4. Comercio exterior de contenedores en Chile 2015 (TEUs)**

<b>Origen/Destino</b>	<b>CHILE</b>	
	<b>Exportaciones</b>	<b>Importaciones</b>
India Subcontinental/Medio Oriente	18.514	11.977
Resto de Asia	284.685	331.843
Australia y Nueva Zelanda	4.436	2.238
América Latina (Incluye México y el Caribe)	185.327	115.200
Mediterráneo/Mar Negro	51.410	29.857
Norte de Europa	138.805	73.818
África	13.307	1.536
América del Norte	246.133	200.487
Total mundial	952.541	769.220

Fuente: CEPAL

---

<sup>11</sup> Para Panamá el año más reciente fue 2009

**Tabla 5. Comercio exterior de contenedores en Chile 2015 ajustado por el dato de movimiento de contenedores (TEUs)**

Origen/Destino	CHILE	
	Exportaciones	Importaciones
India Subcontinental/Medio Oriente	42.796	27.685
Resto de Asia	658.056	767.063
Australia y Nueva Zelanda	10.254	5.173
América Latina (Incluye México y el Caribe)	428.388	266.288
Mediterráneo/Mar Negro	118.835	69.015
Norte de Europa	320.851	170.632
África	30.759	3.551
América del Norte	568.942	463.431
Total mundial	952.541	769.220

Fuente: CEPAL

Por otro lado, y de acuerdo de nuevo con los datos de comercio contenedorizado de la CEPAL, el flujo de contenedores exportados desde Chile a Asia es de 658.056 TEUs en 2015 (Tabla 6). Este último dato se multiplicó por la proporción de exportaciones de Chile a China antes calculado y que era del 50%. Se procedió de igual modo con el resto de regiones, países y tipo de comercio (exportaciones e importaciones). Conviene hacer notar que los datos de comercio de contenedores y los de comercio entre países se refieren a años diferentes. Esto es, si bien los datos de contenedores son de 2015, el reparto de los mismos se hizo tomando como base a la estructura comercial de 2011 (2009 en el caso de Panamá). La hipótesis de partida es que dicha estructura comercial, pese a los años transcurridos, no se ha modificado de forma sustancial en 2015.

La Figura 2 muestra, esquemáticamente y para el caso de Chile, los pasos anteriormente explicados para el reparto de contenedores comercializados por regiones entre países. Como se puede observar, el dato de contenedores aparece ahora (figura de la derecha) repartido por países y regiones (otros países y resto de Asia) en vez de sólo por regiones. La región de Australia y Nueva Zelanda que aparece en la tabla de la izquierda se contabiliza en la tabla de la derecha como "resto de Asia". Como también se aprecia en la Figura 2 el dato de contenedores distingue entre Estados Unidos este y oeste. Esta distinción obedece a la necesidad de tener una visión más detallada de los contenedores que vienen por ambas costas de cara a modelizar el flujo de contenedores, teniendo en cuenta su paso por el Canal de Panamá. Al reparto de contenedores distinguiendo entre la costa este y oeste de Estados Unidos, siguió un planteamiento análogo a lo explicado anteriormente, con la salvedad de que se usaron los datos de "United States Census Bureau" para el reparto de contenedores entre ambas costas y los seis países latinoamericanos. Estos datos vienen a nivel de puerto lo que permite

distinguir fácilmente ambas costas. Así mismo, los datos por puertos vienen en toneladas movilizadas.

**Figura 2. Contenedores importados y exportados de Chile por países**

Origen/Destino	CHILE	
	Exportaciones	Importaciones
Australia y Nueva Zelanda	10254	5173
Asia	658056	767063
India Subcontinental/Medio Oriente	42796	27685
América Latina (Incluye México y El Caribe)	428388	266288
Mediterráneo/Mar Negro	118835	69015
Norte de Europa	320851	170632
África	30759	3551
América del Norte	568942	463431
Total mundial	952.541	769.220

Fuente: CEPAL

Reparto de acuerdo a datos de comercio internacional entre países (volúmenes) →

Datos Contenedores por países

	exportaciones	importaciones
Ecuador	19948	19842
Colombia	33028	64586
Perú	56877	23447
Otros Países	177532	32530
México	66564	8665
Unión Europea	439687	239647
Países asiáticos	47688	149578
China	332988	216874
Corea	39864	231946
Japón	227150	168574
Taiwán	17298	5127
Hong Kong	3322	137
Argentina	37433	131347
Brasil	159026	52261
Panamá	2717	104
Estados Unidos este	492036	346723
Estados Unidos oeste	48663	86681

Mención aparte merece el caso de Panamá. Los datos de contenedores, como los mostrados en la Tabla 4 y Tabla 6, no se encuentran disponibles en el mismo formato para este país, como sí ocurre con el resto de países latinoamericanos aquí estudiados, sino que vienen agregados bajo la categoría "América Central". Así, la manera de repartir los contenedores enfrenta un primer ajuste que consiste en estimar el peso de Panamá en el total de América Central y así aproximar el total de contenedores panameños por regiones para, seguidamente, proceder al reparto de contenedores como ya se explicó para el resto de países.

Este obligado primer ajuste se hizo también tomando como base los datos de comercio internacional entre países de la CEPAL. A modo de ejemplo, el volumen de exportaciones de América Central con Asia en 2009 supuso en torno a 1,4 millones de toneladas de las cuales 123.200 toneladas corresponden a Panamá. Este dato implica que las exportaciones de Panamá a Asia suponen un 8.5% del total de América Central. Este porcentaje se aplicó sobre el total de contenedores exportados desde América Central a Asia. Se procedió igualmente con el resto de regiones de tal forma que se obtuvo una tabla similar a la Tabla 4 pero adaptada a Panamá en vez de a América Central. De aquí en adelante se procedió de igual forma a lo explicado para el resto de países y ejemplificado en el caso de Chile.

La Tabla 6 y la Tabla 7 muestran la base de datos para el año 2015. Como puede apreciarse, el flujo de contenedores distingue entre exportaciones (Tabla 6) e importaciones (Tabla 7) entre los seis países latinoamericanos y las dieciocho regiones/países aquí considerados.

Finalmente, se llevó a cabo un último ajuste sobre las dos tablas anteriores con el fin de aproximar mejor el comercio de contenedores por rutas comerciales.

**Tabla 6. Contenedores exportados en 2015 según país y región (TEUs)**

	Ecuador	Colombia	Perú	Chile	México	Panamá	Argentina	Brasil	Europa	China	Corea	Japón	Taiwán	Hong Kong	Resto Asia	Estados Unidos este	Estados Unidos oeste	Otros Países	Total
Ecuador		9.392	33.950	24826	686	936	936	374	284.864	1.465	225	7.780	151	89	33.099	390.555	24.929	161.000	975.257
Colombia	15.073		20.438	115382	13.129	12.853	12853	61.226	465.442	35.816	3.061	4.924	5.553	88	7.945	733.129	55.182	186.253	1.748.347
Perú	9.672	7.683		25108	10.924	1.437	1437	10.890	139.685	67.465	6.847	8.690	752	118	5.306	143.484	19.566	136.237	595.301
Chile	19.948	33.028	56.877		66.564	2.717	37433	159.026	439.687	332.988	39.864	227.150	17.298	3.322	47.688	492.036	48.663	177.532	2.201.821
México	27.524	298.699	46.086	47079		10.091	10091	224.264	527.899	216.435	35.904	143.064	22.904	12.524	46.430	400.028	8.164	123.815	2.201.001
Panamá	2.804	2.337	374	421	608	0	0	608	795.321	17.548	9.749	1.950	48.745	1.950	38.430	49.2023	0	5.093	1.417.959
Total	75.021	351.139	157.725	212816	91.911	28.034	62750	456.388	2.652.898	671.717	95.650	393.558	95.403	18.091	178.898	2.651.255	156.504	789.930	

**Tabla 7. Contenedores importados en 2015 según país y región (TEUs)**

	Ecuador	Colombia	Perú	Chile	México	Panamá	Argentina	Brasil	Europa	China	Corea	Japón	Taiwán	Hong Kong	Resto Asia	Estados Unidos este	Estados Unidos oeste	Otros Países	Total
Ecuador		23.489	27041	8.742	19.177	10.759	23.626	10.759	81.812	214.462	52.869	29.990	13.256	1.284	95.014	127.339	92.211	386.002	1.217.832
Colombia	20.496		21646	22.003	70.866	50.965	169.775	50.965	139.364	376.640	44.570	58.317	17.652	3.530	90.031	400.335	16.681	143.491	1.697.327
Perú	70.410	37.174		33.897	16.218	37.443	157.234	37.443	284.294	316.555	74.857	61.243	17.908	431	160.438	261.572	82.602	31.347	168.1066
Chile	19.842	64.586	23447		8.665	104	131.347	52.261	239.647	216.874	231.946	168.574	5.127	137	149.578	346.723	86.681	32.530	177.8069
México	428	6.424	6140	8.860		152.285	88	152.285	519.881	702.777	94.000	321.121	212.879	1.170	454.780	142.445	15.827	186.568	2.977.958
Panamá	48.463	96.927	19385	9.693	63.002		9.693	58.156	437.030	1.036.746	747.421	361.655	48.221	48.221	65.286	1.785.577		520.529	5.356.005
Total	159.639	228.600	97659	83.195	177.928	251.556	491.763	361.869	1.702.028	2.864.054	1.245.663	1.000.900	315.043	54.773	1.015.127	3.063.991	294.002	1.300.467	

En esta línea, dos nuevos cálculos se llevaron a cabo. Primero, el dato de comercio de contenedores (importación y exportación) de Estados Unidos costa este se dividió entre Nueva York y Miami. Segundo, el dato de comercio de contenedores (importación y exportación) de Colombia se repartió entre aquellos originados en el Caribe (puerto de Cartagena) y en el Pacífico (puerto de Buenaventura).

Para el primer reparto, se hizo nuevamente uso de los datos de "United States Census Bureau". Esta vez, el criterio para repartir el comercio de contenedores entre ambas ciudades/rutas consistió en distinguir aquellos puertos que, manteniendo flujo de contenedores con los países latino americanos objeto de este estudio, se encontraban geográficamente por debajo o por encima de Miami. A modo de ejemplo, y centrando la atención una vez más en las exportaciones y en Chile, por debajo de Miami se encuentran tres puertos principales que sirven a Chile que son, por orden de importancia: Houston, Nueva Orleans y Mobile. Los datos de estos tres puertos se sumaron a los de Miami lo que supone en torno a un 60% del total de contenedores exportados a Chile del total de puertos de la costa este de EEUU. En consecuencia, la ruta de Nueva York mueve el 40% restante de contenedores. Se procedió de igual forma con el resto de países Latino Americanos aquí analizados.

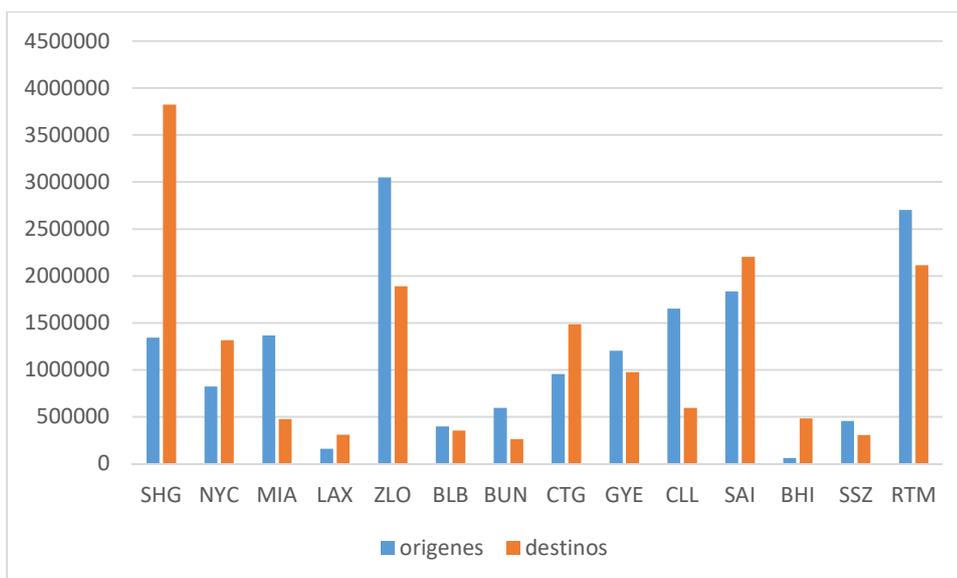
Para el segundo reparto, se contabilizó el total de contenedores de las dos costas colombianas (Caribe y Pacífico) considerando la clasificación de puertos de la CEPAL; observándose que cada costa mueve, aproximadamente, el 26% y el 74%, respectivamente.

Incorporando estas nuevas consideraciones se obtiene la Tabla 8 de contenedores comercializados por rutas donde por columnas figuran los destinos y por filas los orígenes del tráfico de contenedores comercializados por puertos; y donde los códigos y nombres de los puertos son los siguientes: SHG (Shanghái), NYC (Nueva York), MIA (Miami), LAX (Los Ángeles), ZLO (Manzanillo), BLB (Balboa), Buenaventura (BUN), CTG (Cartagena), GYE (Guayaquil), CLL (Callao), CHI (Chile), BHB (Bahía Blanca), SSZ (Santos) y RTM (Róterdam). Como se observa en esta tabla, desde el punto de vista de las rutas marítimas, los países asiáticos considerados en el análisis han sido agregados en un único puerto, el puerto de Shanghái (SHG). A partir de esta tabla se construye la Figura 3. Esta figura muestra el movimiento de contenedores por rutas para Chile en 2015, observándose que tres rutas destacan sobre el resto. Por orden de importancia, éstas son: la ruta asiática (Shanghái, SHG), la ruta europea (Róterdam, RTM) y las dos rutas de la costa este de EEUU (Nueva York, NYC; y Miami, MIA).

**Tabla 8: Flujo de contenedores por origen y destino según puertos en 2015 (TEUs por año)**

	SHG	NYC	MIA	LAX	ZLO	BLB	BUN	CTG	GYE	CLL	CHI	BHI	SSZ	RTM
SHG	-	-	-	-	1.786.727	169.357	14.920	42.466	406.875	631.432	772.236	-	-	-
NYC	-	-	-	-	65.524	43.324	348.291	348.291	101.871	128.170	280.845	-	-	-
MIA	-	-	-	-	76.920	70.687	52.043	52.043	25.467	133.401	65.877	-	-	-
LAX	-	-	-	-	15.827	17.036	4337	12.343	92.211	82.602	86.681	-	-	-
ZLO	477.261	96.006	304.021	8.164	-	4.623	18.425	52.440	19.177	16.218	8.665	10.091	224.264	651.714
BLB	8.687	24.033	7.382	4.694	152.285	-	13.250	37.714	10.759	37.443	104	0	44	58.743
BUN	14.920	-	-	14.347	3.413	3.341	-	-	3.918	5.313	29.999	3.341	15.918	169.439
CTG	42.466	315.245	417.883	40.834	9.715	9.511	-	-	11.154	15.124	85.382	9.511	45.307	482.254
GYE	42.809	148.410	242.144	24.929	686	936	2.441	6.950	-	33.950	24.826	936	374	445.864
CLL	89.178	43.045	100.438	19.566	10.924	1.437	1.997	6.950	9.672	-	25.108	1.437	10.890	275.922
CHI	668.310	196.814	295.221	48.663	66.564	2.717	8.587	24.440	19.948	56.877	-	37.433	159.026	617.219
BHI	-	-	-	-	88	711	44.141	125.633	23.626	157.234	131.347	-	-	-
SSZ	-	-	-	-	152.285	4.268	13.250	37.714	10.759	37.443	52.261	-	-	-
RTM	-	-	-	-	706.449	70.277	73.541	209.312	467.814	315.641	272.177	-	-	-

**Figura 3. Movimiento de contenedores 2015**



La matriz de demanda de contenedores utilizada finalmente en el modelo es preparada a partir de la Figura 3, llevando a cabo ciertas modificaciones en la misma. En primer lugar, se eliminan los flujos de importación y exportación de contenedores de Argentina y Brazil que no tengan Chile como origen o destino. Por otro lado, los datos de Panamá se reparten entre Balboa y Manzanillo según el origen y destino de los flujos estén situados en el pacífico o en el Atlántico. Además, se utilizan datos semanales, no anuales. La Tabla 9 muestra los datos finalmente utilizados en el modelo, en TEUs para el periodo inicial de 2015.

**Tabla 9. Matriz final de flujos de contenedores por origen y destino según puertos en 2015 (TEUs semanales)**

	SHG	NYC	MIA	LAX	ZLO	MIT	BLB	BUN	CTG	GYE	CLL	CHI	BHI	SSZ	RTM
SHG	-	-	-	-	34.360	-	3.256	286	816	7.824	12.142	14.850	-	-	-
NYC	-	-	-	-	1.260	833	-	6.697	6.697	1.959	2.464	5.400	-	-	-
MIA	-	-	-	-	1.479	1.359	-	1.000	1.000	489	2.565	1.266	-	-	-
LAX	-	-	-	-	304	-	327	83	237	1.773	1.588	1.666	-	-	-
ZLO	9.178	1.846	5.846	157	-	-	88	354	1.008	368	311	166	-	-	10.151
MIT	-	462	141	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BLB	167	-	-	90	2.928	-	-	254	725	206	720	2	-	-	1.122
BUN	286	-	-	275	65	-	64	-	-	75	102	576	-	-	2.327
CTG	816	6.062	8.036	785	186	-	182	-	-	214	290	1.641	-	-	6.623
GYE	823	2.854	4.656	479	13	-	18	46	133	-	652	477	-	-	5.478
CLL	1.714	827	1.931	376	210	-	27	38	133	186	-	482	-	-	2.686
CHI	12.852	3.784	5.677	935	1.280	-	52	165	470	383	1.093	-	719	3.058	8.455
BHI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.525	-	-	-
SSZ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.005	-	-	-
RTM	-	-	-	-	9.997	-	616	696	1.983	1.573	5.467	4.608	-	-	-

### 3.4.2 Datos de buques y puertos

Este apartado explica la forma en que se han obtenido los datos utilizados en la aplicación del modelo. Se consideran los datos relativos al consumo de combustible de los distintos tipos de barco, los tiempos de carga y descarga en los puertos, los costes operacionales del buque, y los costes asociados al uso del puerto.

#### 3.4.2.1 Consumo de combustible por tipo de buques

El consumo de combustible de un buque depende de sus propiedades y de la velocidad a la que se mueva. Tomando como referencia los datos encontrados en Stopford (2009)<sup>12</sup>, se ha construido la Tabla 10. La primera columna de la tabla indica el tipo de barco. La segunda columna muestra la capacidad del buque (TEUs). En la tercera columna se tiene la velocidad de diseño (VD, medido en kts, donde kts=nudos/hora). La cuarta columna contiene el consumo a la velocidad de diseño (f). En las cuatro últimas columnas figura el consumo estimado (Tn/h) para una velocidad igual a 18, 20, 22 y 24 nudos, respectivamente. Así, por ejemplo, para una velocidad de 18 nudos, un portacontenedores VLBC, con una capacidad de 13.000 TEUs, tiene un consumo estimado de 6,3 Tn/h (*consumo estimado = (velocidad / VD) × f*).

Comparado con un modelo Handy, cuya capacidad es 1.500 TEUs, con un consumo de 1,9 Tn/h para 18 nudos, el buque tipo VLBC tiene un consumo por hora de viaje bastante superior. Sin embargo, considerando las capacidades de estos dos tipos de buque, si se utiliza toda la capacidad del barco, el consumo por contenedor transportado en el buque VLBC es inferior al que resulta usando uno de tipo Handy (0,00129 Tn/h para el VLBC frente a 0,00048 Tn/h para el Handy). A medida que la velocidad del barco aumenta se incrementa el consumo si bien este incremento decrece con el aumento de la velocidad. Obsérvese por ejemplo que al pasar de 18 a 20 nudos el consumo aumenta un 11%, pero si se pasa de 22 a 24 el aumento en el consumo es de un 9%.

---

<sup>12</sup>Página 584, tabla 14.7

**Tabla 10. Consumo por tipo de buque**

Tipo de barco	TEUs	VD (kts)	Ton/h (f)	Consumo estimado Tn/h (18 nudos)	Consumo estimado Tn/h (20 nudos)	Consumo estimado Tn/h (22 nudos)	Consumo estimado Tn/h (24 nudos)
Handy	1.500	19	2,1	1,9	2,2	2,2	2,6
Panamax	3.000	22,5	4,4	3,5	3,9	3,9	4,6
Post-panamax	5.000	24,5	6,6	4,9	5,4	5,4	6,5
VLBC	7.000	25,2	8,8	6,3	7,0	7,0	8,4
VLBC	9.000	25,2	8,8	6,3	7,0	7,0	8,4
VLBC	13.000	25,2	8,8	6,3	7,0	7,0	8,4
VLBC	18.000	25,2	8,8	6,3	7,0	7,0	8,4

### 3.4.2.2 Tiempos de carga y descarga en puerto

Para determinar los tiempos de carga y descarga se aplicó el procedimiento mostrado en Otero Rivera (2002a y 2002b) para el cálculo de la eslora (LOA) de los buques ( $LOA = 3,527 \times TEUs^{0,323} VD^{0,4766}$ ). Se consideró igualmente un rendimiento normal por grúa de 27 TEUs por hora. La Tabla 11 muestra el número de grúas contempladas por tipo de barco. La primera columna indica el tipo de barco clasificado por su capacidad en TEUs. La segunda columna indica la eslora (en m). En la tercera columna aparece el número de grúas asignadas. Las dos últimas columnas incluyen la longitud media ocupada por grúa (en m) y las horas empleadas por TEU, respectivamente. Dichos datos se asumieron iguales para todos los puertos.

**Tabla 11. Tiempos de carga y descarga por tipo de buque**

<b>Buque TEUs</b>	<b>Eslora (LOA) (m)</b>	<b>Grúas</b>	<b>Longitud media ocupada por grúa (m)</b>	<b>Horas/TEU</b>
1.500	152	2	76	0,019
3.000	207	3	69	0,012
5.000	254	3	85	0,012
7.000	287	4	72	0,009
9.000	311	4	78	0,009
13.000	350	5	70	0,007
18.000	400	6	66	0,0061

### 3.4.2.3 Costes operativos y de amortización

Los costes operativos han sido ajustados económicamente utilizando los datos para los distintos tipos de buque (clasificados según su capacidad en TEUs) y los costes operativos diarios observados en Stopford (2009)<sup>13</sup>. Sobre la base de los citados datos, y pese a lo escaso de la muestra (6 datos), se llevó a cabo un ajuste por mínimos cuadrados ordinarios siendo la forma funcional lineal la elegida. La bondad del ajuste, medida a través del R cuadrado ajustado, es superior al 0.90. Así mismo, los parámetros estimados muestran una alta significatividad, entre el 1% y el 5%. De este modo, la relación estimada entre costes operacionales diarios y TEUs es como sigue:  $costes = 4713 + 0.265TEUs$ . La Tabla 12 muestra los costes operativos estimados para los tipos de buques considerados en este estudio.

A los costes anteriores se les añadió el coste de amortización de los buques. Este dato se aproximó de acuerdo al informe de Murray<sup>14</sup>(2016) en el cual se muestran los costes de construcción por tipo de buque (dólares por TEUs). De acuerdo a dicha fuente, los costes de construcción por tipo de buque ascienden a 25.523.385 de dólares para un buque de 1500 TEUs, 4.8766.350 dólares para uno de 3.000 TEUs, 73.362.700 dólares para uno de 5.000 TEUs, 97.385.120 dólares para uno de 7.000 TEUs, 103.422.240 dólares para uno de 9.000 TEUs, 120.884.660 dólares para uno de 13.000 TEUs y 167.378.760 dólares para uno de 18.000 TEUs. Se asumió una amortización lineal para un horizonte de 25 años y un valor residual como porcentaje del valor inicial del buque del 5%. Los coste de amortización semanales pueden verse en la Tabla 12.

<sup>13</sup> Páginas 540-541, tabla 13.8

<sup>14</sup><https://www.usmma.edu/academics/%E2%80%9Ceconomies-scale-container-ship-costs%E2%80%9D-midshipman-william-murray-class-2016>

**Tabla 12. Costes operativos semanales por tipo de buque (USD)**

<b>Tipo de buque</b>	<b>Costes operativos</b>	<b>Costes amortización</b>	<b>Costes operativos totales (incluida la amortización)</b>
1.500	35.774	21.063	56.837
3.000	38.556	35.637	74.193
5.000	42.266	53.611	95.877
7.000	45.976	71.166	117.142
9.000	49.686	75.578	125.264
13.000	57.106	88.339	145.445
18.000	66.381	122.315	188.696

#### **3.4.2.4 Costes por puerto**

Tal y como se indicó con anterioridad, los puertos de recepción de contenedores que se consideraron en el modelo, además de Chile, son Manzanillo en México, Balboa y Manzanillo en Panamá, Cartagena y Buenaventura en Colombia, Guayaquil en Ecuador y Callao en Perú. Para el caso de Chile se utiliza un valor de los costes obtenido como resultado de calcular la media de los costes de los dos puertos principales del país: San Antonio y Valparaíso. A partir de consultas en las páginas web de los puertos, pudo obtenerse la mayoría de las tarifas<sup>15</sup>. Para el

---

<sup>15</sup> Tarifas Puerto Buenaventura, Colombia. (2016). Sociedad Portuaria de Buenaventura S.A. <http://www.sprbun.com/web/portal/uso-instalaciones-portuarias-a-la-carga-ii>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto Callao, Perú. (2016). Recuperado el 7 Abril 2016, de APM Terminals. <https://www.apmterminalscallao.com.pe/images/reglamentos/163097733English-version-Tariff-4.1---Effective-as-from-Jan-18th-2016.pdf>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto Cartagena, Colombia. (2016). Contenedores de Cartagena S.A. <http://cisne.puertocartagena.com/opadmco.nsf/vstRefLinkDoc/37D905BEA5D10E2505257899004AA0E2>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto de Manzanillo, México. (2016.). Administración Portuaria Integral de Manzanillo S.A. <http://www.puertomanzanillo.com.mx/esps/0000207/tarifas>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto de San Antonio, Chile. (2016). SAAM Puertos S.A. [http://www.stiport.cl/quienes\\_somos/medios/manuales/tarifasgral.pdf](http://www.stiport.cl/quienes_somos/medios/manuales/tarifasgral.pdf). [Accessed 7 de Abril de 2016]

caso de los puertos panameños, no se obtuvo información tarifaria, salvo para el coste de movimiento de contenedores como se indica en el siguiente apartado. Para el resto de costes relacionados con estos puertos, en general, se asumieron los costes medios del resto de puertos latinoamericanos aquí analizados.

Para el caso de los puertos de origen (Shanghái, Nueva York, Miami, Los Ángeles, Bahía Blanca (Argentina), Puerto Santos (Brasil) y Róterdam), se tomaron como referencia los costes de aplicación en los puertos siguientes<sup>16</sup>: Rosyth-Zeebrugge, Bremerhaven-Gothenburg, Esbjerg-Inmigham. Cada tarifa considerada es explicada a continuación en su respectivo epígrafe.

### **3.4.2.5 Coste de movimiento de contenedores**

El movimiento de contenedores en el puerto comprende tres procesos: movimiento de barco a muelle (estiba/desestiba), de muelle a patio y de patio a camión y viceversa. Estos procesos constituyen un ciclo. El movimiento en terminal incluye el proceso entre la estiba/desestiba y la colocación del contenedor en el camión para su despacho. Este coste no estaba disponible salvo para el caso de Manzanillo (México), mientras que para otros puertos como Valparaíso se cotiza el ciclo completo.

En el caso de Manzanillo, el movimiento en terminal supone un 70% del coste total aproximadamente. Esta misma proporción se aplicó a las cotizaciones de ciclo completo que proporcionaban otros puertos, como es el caso de los chilenos. En los casos en los que solo se disponía de las tasas por estiba y desestiba, se dividió dicho coste entre 0,3 para calcular el coste del ciclo completo, calculando posteriormente el coste correspondiente al movimiento en terminal. Finalmente,

---

Tarifas Puerto de Valparaíso, Chile. (2016). Terminal Pacífico Sur. [http://portal.tps.cl/tps/site/artic/20060124/asocfile/20060124152711/anexo\\_tarifas\\_tps\\_12\\_mayo\\_2016.pdf](http://portal.tps.cl/tps/site/artic/20060124/asocfile/20060124152711/anexo_tarifas_tps_12_mayo_2016.pdf) . [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto Guayaquil, Ecuador. (2016). CONTECON S.A. <http://www.cgsa.com.ec/servicios.aspx> . [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas puertos Manzanillo y Balboa, Panamá. (2010). Panamá América, grupo EPASA. <http://www.panamaamerica.com.pa/content/tarifa-por-movimiento-de-contenedores-ser%C3%A1-variable>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

<sup>16</sup> The Flemish pilotage fees, pilotage charges and other costs effective from 1 July 2011 <http://www.loodswezen.be/docs/en/loodsgeldtarieven-en.pdf>

Schedule of port charges (Bremenports), 2012

<http://www.bremenports.de/en/location/port-charges/schedule-of-port-charges>

Special restrictions (due to port regulations for Göteborg § 20)

<http://www.sjofartsverket.se/en/Our-Activities/Pilotage/Pilot-Areas/Goteborg-Pilot-Area/Standards--Procedures/Towage/Towage-Goteborg-Pilot-Station/Towage-Arendal-Skandia--Alvsborgs-harbours/>

respecto a los puertos panameños se asumió un coste de estiba/desestiba de 12 dólares por contenedor<sup>17</sup> para 2010, que se actualizó a 2016 considerando los datos de inflación del país obtenidos del Banco Mundial. En la

Tabla 13 se muestran los valores obtenidos.

**Tabla 13. Coste de movimiento de contenedores (USD)**

<b>Puerto</b>	<b>Estiba/Desestiba</b>	<b>Movimiento en terminal</b>	<b>Coste total</b>
Manzanillo	79	180	260
Balboa	14	34	48
Manzanillo (Panamá)	14	34	48
Cartagena	110	280	390
Buenaventura	81	190	271
Guayaquil	170	395	565
Callao	79	186	265
Chile	77	180	257
Shanghái	31	72	103
Nueva York	31	72	103
Miami	31	72	103
Los Ángeles	31	72	103
Bahía Blanca	31	72	103
Puerto Santos	31	72	103
Róterdam	31	72	103

### **3.4.2.6 Costes de Transbordo**

El porcentaje medio observado para los puertos latinoamericanos considerados en este modelo, diferentes de los de Panamá, asciende a un 0,48% del coste total de manipulación de los contenedores. Esa misma proporción fue utilizada para el cálculo de los costes de transbordo en los puertos panameños. La Tabla 14 muestra los costes de transbordo para contenedores llenos.

---

<sup>17</sup>El coste por movimiento por contenedor se obtuvo de la siguiente fuente: <http://www.panamaamerica.com.pa/content/tarifa-por-movimiento-de-contenedores-ser%C3%A1-variable>

**Tabla 14. Costes de Transbordo (USD/TEU)**

<b>Puerto</b>	<b>Contenedores 20 pies</b>
Manzanillo	249
Balboa	23
Manzanillo (Panamá)	23
Cartagena	200
Buenaventura	36
Guayaquil	117
Callao	76
Chile	12
Shanghái	31
Nueva York	31
Miami	31
Los Ángeles	31
Bahía Blanca	31
Puerto Santos	31
Róterdam	31

#### **3.4.2.7 Costes de atraque**

Los costes de atraque dependen de la eslora del buque y de las horas que éste permanece atracado en el muelle. La eslora por tipo de buque se obtuvo de *SignificantShips* (2014). Para el cálculo del número de horas de atraque se asumió una estancia media de 24 horas. Para los puertos de Panamá, el coste de atraque es la media del resto de puertos latinoamericanos aquí considerados. Para los puertos de origen se asumió el coste de atraque del puerto de Houston<sup>18</sup>. La Tabla 15 muestra el coste del atraque por puerto.

---

<sup>18</sup> Tarifas puerto de Houston.(s.f). <http://www.portofhouston.com/static/gen/misc/Tariffs/PHA-Tariff08-2016-0101.pdf>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

**Tabla 15. Costes de atraque por puerto y tipo de buque (USD)**

Puerto	Capacidad en TEUs						
	1.500	3.000	5.000	7.000	9.000	13.000	18.000
Manzanillo	2.501	2.909	3.549	3.898	4.258	4.619	4.654
Balboa	5.676	6.600	8.052	8.844	9.662	10.480	10.560
Manzanillo (Panamá)	5.676	6.600	8.052	8.844	9.662	10.480	10.560
Cartagena	3.715	4.320	5.270	5.788	6.324	6.860	6.912
Buenaventura	2.580	3.000	3.660	4.020	4.392	4.764	4.800
Guayaquil	6.708	7.800	9.516	10.452	11.419	12.386	12.480
Callao	3.818	4.440	5.416	5.949	6.500	7.050	7.104
Chile	8.720	10.140	12.370	13.587	14.844	16.102	16.224
Shanghái	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164
Nueva York	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164
Miami	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164
Los Ángeles	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164
Bahía Blanca	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164
Puerto Santos	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164
Róterdam	4.537	7.406	10.884	12.298	13.338	15.020	17.164

### 3.4.2.8 Costes de llamada a puerto

Bajo este concepto se agruparon los costes relacionados con el practicaje y el remolque en puerto. Según los datos consultados, cada puerto cotiza estos servicios de manera diferente si bien no todos lo muestran en sus tarifas. Además, es un coste que depende de una gran variedad de parámetros lo que redundaría en una mayor casuística a la hora de calcularlo para cada buque. Estos parámetros dependen de cuestiones de maniobrabilidad dentro del puerto, climatología, tamaño del buque (lo que a su vez puede implicar el uso de más de un remolque), experiencia del capitán o pabellón del buque, entre otras cuestiones. Así, por ejemplo, el puerto de Cartagena cotiza los servicios de practicaje y remolcador por maniobra, mientras que en general, los puertos chilenos cotizan dichos servicios en base al tonelaje de registro bruto (Trg) (*Sudamericana Agencia Aérea y Marítimas S.A.*).

Finalmente, se optó por usar la cotización de la empresa *Sudamericana Agencia Aérea y Marítimas S.A.* para aproximar el coste del remolque. Para el practicaje se tuvo en cuenta el decreto de la Armada de Chile sancionado en Junio de 1979 y

modificado por última vez en Abril de 2015. En su artículo 301, referente al practicaaje, se recoge la tarifa en función del tonelaje de registro grueso. La tarifa considera una base mínima a pagar según un rango de Trg, a lo que hay que añadir un factor de corrección por Trg. A modo de ejemplo, y de acuerdo con las cifras del citado decreto, el coste de remolque de un buque de 9.000 TEUs (90.290 Trg aproximadamente) asciende a 2.677,12 USD de los cuales 420,12 USD corresponden a la parte fija y 2.257 USD a la parte variable que se obtiene de multiplicar el factor correspondiente (0,025) por el Trg. (90.290). La Tabla 16 muestra la tarifa por remolque y practicaaje para los tipos de barco considerados. Dichos costes se asumieron iguales para todos los puertos. Dichos costes se asumieron iguales para todos los puertos, salvo para los puertos no latino americanos<sup>19</sup>.

**Tabla 16. Coste de practicaaje y remolque por tipo de buque (USD)**

	<b>Capacidad en TEUs</b>						
	<b>1.500</b>	<b>3.000</b>	<b>5.000</b>	<b>7.000</b>	<b>9.000</b>	<b>13.000</b>	<b>18.000</b>
<b>Practicaaje</b>	2.410	3.695	3.695	4.315	4.935	6.485	7.415
<b>Remolque</b>	573	1.526	1.546	2.175	2.677	4.062	4.862

**3.4.2.9 Costes del Canal de Panamá**

El tránsito por el Canal comprende dos tipos de costes: la tasa por buque y por TEU tanto antes de la ampliación del Canal (*pre*) como después (*post*). Ambos se obtuvieron de la página web de la autoridad del Canal<sup>20</sup> y se muestran en la Tabla 17.

---

<sup>19</sup> Para estos puertos se tomaron los datos de los siguientes puertos: Rosyth-Zeebrugge, Bremerhaven-Gothenburg y Esbjerg-Inmigham.

<sup>20</sup> Autoridad del Canal de Panamá, Maritime Services-PanCanal.com, 2015. (<http://micanaldepanama.com>).

**Tabla 17. Tasa por buque y TEU antes y después de la ampliación del Canal de Panamá**

	<b>Capacidad en TEUs</b>						
	<b>1.500</b>	<b>3.000</b>	<b>5.000</b>	<b>7.000</b>	<b>9.000</b>	<b>13.000</b>	<b>18.000</b>
<b>Buque (miles USD)</b>							
<b>Tasas pre</b>	111	222	370	518	666	962	1.332
<b>Tasas post</b>	90	180	300	350	450	650	900
<b>Teu (USD)</b>							
<b>Tasas pre</b>	8	8	8	8	8	8	8
<b>Tasas post</b>	30	30	30	40	35	35	35

### 3.4.3 Rutas y datos utilizados en el modelo

Con el fin de ilustrar el funcionamiento del modelo, se describen los elementos incorporados en el mismo mostrando los datos concretos empleados en las pruebas realizadas.

Los puertos considerados para definir las rutas figuran en la Tabla 18.

**Tabla 18. Puertos de recalada**

<b>Asia</b>	<b>SHA</b> Shanghái
<b>Suramérica</b>	<b>BLB</b> Balboa <b>BUN</b> Buenaventura <b>CLL</b> Callao <b>CTG</b> Cartagena de Indias <b>GYE</b> Guayaquil <b>ZLO</b> Manzanillo (México) <b>MIT</b> Manzanillo (Panamá) <b>CHI</b> Chile <b>BHI</b> Bahía Blanca <b>SSZ</b> Santos
<b>USA</b>	<b>LAX</b> Los Ángeles <b>MIA</b> Miami <b>NYC</b> NuevaYork
<b>Europa</b>	<b>RTM</b> Róterdam

Se han construido las quince rutas señaladas en la Tabla 19:

**Tabla 19. Rutas utilizadas**

<b>Ruta</b>	<b>Itinerario</b>
1	SHG-ZLO-BLB-BUN-GYE-CLL-CHI-CLL-GYE-BUN-BLB-ZLO-SHA
2	NYC-MIA-MIT-BLB-BUN-GYE-CLL-CHI-CLL-GYE-BUN-BLB-MIT-MIA-NYC
3	RTM-CTG-MIT-BLB-BUN-GYE-CLL-CHI-CLL-GYE-BUN-BLB-MIT-CTG-RTM
4	LAX-ZLO-BLB-BUN-GYE-CLL-CHI-CLL-GYE-BUN-BLB-ZLO-LAX
5	CHI-BHI-SSZ-BHI-CHI
6	SHG-ZLO-BLB-ZLO-SHG
7	NYC-MIA-MIT-BLB-MIT-MIA-NYC
8	LAX-ZLO-BLB-ZLO-LAX
9	RTM-CTG-MIT-BLB-MIT-CTG-RTM
10	BLB-BUN-GYE-CLL-CHI-CLL-GYE-BUN-BLB
11	BLB-CHI-BLB
12	BLB-CLL-BLB
13	CLL-CHI-CLL
14	BLB-BUN-GYE-CLL-GYE-BUN-BLB
15	ZLO-CHI-ZLO
16	SHG-CHI-SHG

Figura 4. Grandes rutas marítimas consideradas entre Chile y el resto del mundo



Figura 5. Rutas cortas consideradas en el modelo



Las grandes rutas, las rutas 1 a la 4, se muestran en la Figura 4. La primera ruta (en rojo) tiene punto de partida y llegada en Asia, la segunda (en azul) en la costa este de los EEUU, la tercera ruta (en verde) en Europa, y la cuarta (en amarillo) en la costa oeste de los EEUU. La ruta 5 es la ruta que conecta la costa este y oeste de Suramérica.

La Figura 5 muestra las 11 rutas que resultan de particionar las 4 primeras en el puerto de Balboa y de Callao, y de considerar rutas directas a Chile desde Balboa, Callao, Manzanillo (México) y Shanghái. Estas nuevas rutas facilitan la utilización de estos puertos como puertos *hub*.

### 3.5 Diseño de las simulaciones

Puesto que los datos utilizados en el modelo influyen en mayor o menor medida en el resultado y dado que estos datos pueden variar, se ha diseñado un experimento de simulación considerando diferentes valores para ciertos atributos, generándose así un conjunto de varios escenarios. Los atributos y valores que definen estos escenarios son los siguientes:

#### 1. Relativos al Canal de Panamá:

*Estado del Canal de Panamá:* se consideran dos situaciones, antes y después de la ampliación del Canal. Para indicar estos dos estados se utiliza la notación *pre*, para *antes* de la ampliación del Canal, y *post* para *después* de la ampliación.

*Tarifas de uso del Canal de Panamá:* se consideran dos tipos de tarifa, tarifa *pre-ampliación* del Canal y tarifa *post-ampliación* del Canal. La notación utilizada para la primera tarifa es *pret* y para la segunda es *postt*.

Se considera que la situación "pre" se encuentra siempre asociada a la tarifa "pret", mientras que la "post" se ha vinculado a la tarifa "postt".

#### 2. Relativos a la demanda:

*Año:* se consideran las demandas estimadas para los años 2015, 2030 y 2045.

*Tendencia:* para cada año se consideran tres tendencias, pesimista, tendencial y optimista.

Para cada combinación año-tendencia se utiliza la notación *dsy*[año].[tendencia], donde el año se indica con las dos últimas cifras y la tendencia con la letra inicial, es decir, *P*, *T* y *O* para *pesimista*, *tendencial* y *optimista*, respectivamente. Por ejemplo, la combinación año 2020 con la tendencia optimista se denota *dsy20.O*.

Los datos sobre demanda se tomaron del informe *MTT\_Análisis Demanda LP Puertos Estatales V Región\_Informe 2.pdf* (FDC Consultores, 2015). Los

coeficientes de variación que se aplicaron a los datos de demanda del 2015 para obtener los datos de las simulaciones de años posteriores figuran en la Tabla 20.

**Tabla 20. Coeficientes de variación de la demanda**

	<b>P</b>	<b>T</b>	<b>O</b>
<b>dsy15</b>	1,00	1,00	1,00
<b>dsy20</b>	1,32	1,36	1,37
<b>dsy25</b>	1,73	1,81	1,87
<b>dsy30</b>	2,20	2,34	2,53
<b>dsy35</b>	2,76	2,95	3,37
<b>dsy40</b>	3,41	3,65	4,39
<b>dsy45</b>	4,13	4,42	5,63

3.- Relativos a la posibilidad de recalada de buques de hasta 18.000 TEUs:

Al margen de los condicionantes impuestos por las condiciones del Canal de Panamá, se podrían contemplar dos posibles situaciones respecto a la posibilidad de recibir buques de hasta 18.000 TEUs en los puertos de la región. Esto generaría dos casos. En el primer caso se consideraría que estos buques de gran tamaño no pueden recalcar en los puertos de Chile y Guayaquil, mientras que en el segundo este tipo de buques podrían recalcar en cualquiera de los puertos considerados.

El ejercicio se ha llevado a cabo de acuerdo a la siguiente jerarquía. En primer lugar se considera el estado del Canal de Panamá. En segundo y tercer lugar el año y tendencia para la demanda.

### **3.6 Presentación de los resultados obtenidos**

Con la aplicación del modelo descrito en los apartados anteriores se pretende responder a varios de los objetivos específicos del proyecto. En particular, estimar los servicios que atenderán la demanda proyectada, predecir el tamaño de las naves a utilizar en los diferentes servicios, y mostrar los lotes a embarcar en cada uno de los puertos de las rutas consideradas.

La ejecución del modelo genera un importante número de datos que permiten describir los resultados obtenidos. En total, entre parámetros de datos y de resultados se generan más de 150 parámetros en cada escenario de simulación. Con la finalidad de hacer manejable el análisis de los resultados, se han

seleccionado los parámetros que se considera que permiten presentar mejor los resultados específicos del proyecto. Estos parámetros vienen descritos en la Tabla 21. El porcentaje de utilización del barco que se menciona en la tabla se calcula para cada arco de la ruta y para cada línea de la forma siguiente. El porcentaje de utilización del barco para cada arco  $i$  de una ruta (B4\_shiputz\_forate\_lane) se obtiene multiplicando por 100 el resultado de dividir la suma de los flujos que se transportan por ese arco para todas las líneas que hacen esa ruta entre la capacidad total de los barcos que realizan esa ruta. Se procede análogamente para las líneas (B5\_shiputz\_forate\_route), en este caso se divide el flujo transportado por el arco  $i$  en la línea entre la capacidad del barco que opera esa línea y se multiplica el resultado por 100.

Los conceptos a los que se hace referencia cuando se habla de costes en la Tabla 21 y que aparecen detallados en la hoja Excel correspondiente, son los siguientes:

Coste operativo de la flota: vess opr

Coste de bunkering: vess\_fix\_bunk

Coste de tasas portuarias: vess\_fix\_pfee

Coste de tasas del Canal de Panamá: vess\_fix\_cfee

Coste fijo total (vess\_fix\_bunk+vess\_fix\_pfee+vess\_fix\_cfee): vess\_fix

Coste total de la flota (vess opr+vess\_fix): vess

Coste total de atraque: cargo\_berth

Coste de transbordo: cargo\_tr

Coste total de carga y descarga local: cargo\_local

Coste de paso por el Canal debido a la carga: cargo\_cfeec

Coste total debido a la carga (cargo\_berth+cargo\_tr+cargo\_local+cargo\_cfeec): cargo\_tot

Coste total de paso por el Canal de Panamá (vess\_fix\_cfee+cargo\_cfeec):  
channel\_tot

Coste total (vess+cargo\_tot): tot

**Tabla 21. Descripción de valores presentados en el fichero de resultados**

<b>Denominación</b>	<b>Interpretación</b>
D1_demand	Demanda para cada par de puertos origen destino (TEUs)
B1_x_lane	Para cada ruta, número de líneas que utiliza cada tipo de barco
B2_m_lane	Número total de barcos utilizados de cada tipo en cada ruta
B3_m_route	Número total de barcos de cada tipo utilizados en cada línea
B4_shiputz_forate_lane	Porcentaje de uso del barco en cada arco <i>i</i> de la ruta
B5_shiputz_forate_route	Porcentaje de uso del barco en cada arco <i>i</i> para cada línea que realiza cada ruta
C1_costs	Coste total para cada concepto (dólares)
C2_costs_lane	Coste total por ruta para cada concepto (dólares)
C3_costs_route	Coste total por línea para cada concepto (dólares)
C4_fuelcost_tot	Coste total de combustible (dólares)
C5_fuelcost_lane	Coste de combustible por ruta (dólares)
C6_fuelcost_route	Coste de combustible por línea (dólares)
F1_z_route	Movimiento de contenedores (carga y descarga) por línea (TEUs)
F2_check_flow_lane	Carga, descarga, flujo entrante y flujo saliente en cada puerto de la ruta, para cada ruta y para cada origen (TEUs)
F3_check_flow_p	Totales de carga, descarga, flujo entrante y flujo saliente en cada puerto y para cada origen (TEUs)
FLOW-GRAPH	Gráfico con los valores de demanda, carga, descarga y transbordo en cada puerto, y flujos para cada línea (TEUs)
F4_trans_op	Transbordo que se realiza en cada puerto de la carga procedente de cada puerto origen (TEUs)
F5_trans_p	Transbordo total en cada puerto (TEUs)
F6_trans_o	Transbordo total por origen de la mercancía (TEUs)
F7_trans_rat	Porcentaje de transbordo respecto al movimiento total de contenedores
F8_trans_rat_p	Porcentaje de transbordo respecto al movimiento total de contenedores en cada puerto
F9_check_flow_route_p	Totales de carga, descarga, flujo entrante y flujo saliente en cada puerto, para cada origen y para cada línea (TEUs)

Si tenemos en cuenta las diferentes simulaciones realizadas (6), estamos hablando de 142 tablas de datos, por lo que se ha considerado que la mejor opción de presentar esta información consiste en la entrega de una hoja de cálculo (Resultados\_demanda\_exterior.xlsx) que contenga los datos que se han considerado más relevantes en forma de tablas dinámicas.

De esta forma se garantiza que tanto el BID como la Administración Chilena dispongan del máximo posible de información al mismo tiempo que se facilita una forma flexible de selección y presentación de aquellos datos que consideren más relevantes.

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos con la aplicación del modelo. Las ilustraciones mostradas se han preparado a partir de los datos incluidos en la mencionada hoja de cálculo. Dada la complejidad del problema y el elevado número de escenarios posibles se ha optado por seleccionar los que se han considerado más representativos. Concretamente, se han analizado los escenarios *pre* y *post* ampliación del Canal de Panamá para la demanda de tres años (2015, 2030 y 2045) con la tendencia *tendencial (T)* considerando que los puertos tienen capacidad para recibir buques de hasta 18.000 TEUs. En todos los casos se ha considerado una velocidad de 18 nudos.

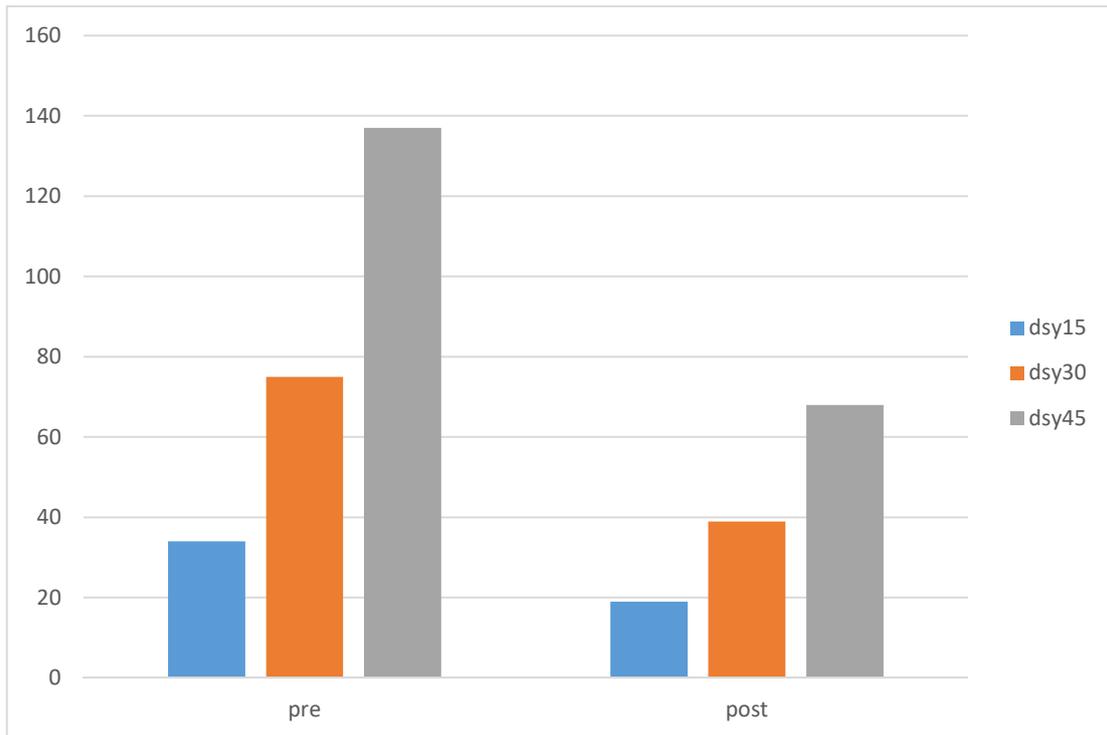
Los primeros resultados presentados hacen referencia al número de servicios operativos en cada una de las condiciones de demanda consideradas (ver Hoja B1 de la hoja de cálculo). El número de servicios viene representado por el número de líneas que operan en cada ruta. La Figura 6 y la Figura 7 muestran el número total de líneas operativas para el conjunto de las rutas contempladas así como para las rutas que tocan puertos chilenos respectivamente.

A partir de estos resultados se observa, por un lado, como el aumento de la demanda hace aumentar lógicamente el número de líneas utilizadas. Ahora bien, mientras la demanda aumenta en un factor de 1,9 entre los años 2030 y 2045 para la tendencia T, la proporción en el aumento del número de líneas es siempre inferior en todos los casos. Esta circunstancia viene explicada por el incremento en la utilización de buques de mayor tamaño. Por otro lado, la ampliación del Canal de Panamá favorece igualmente una reducción en el número de líneas activas (comparando *pre* con *post*).

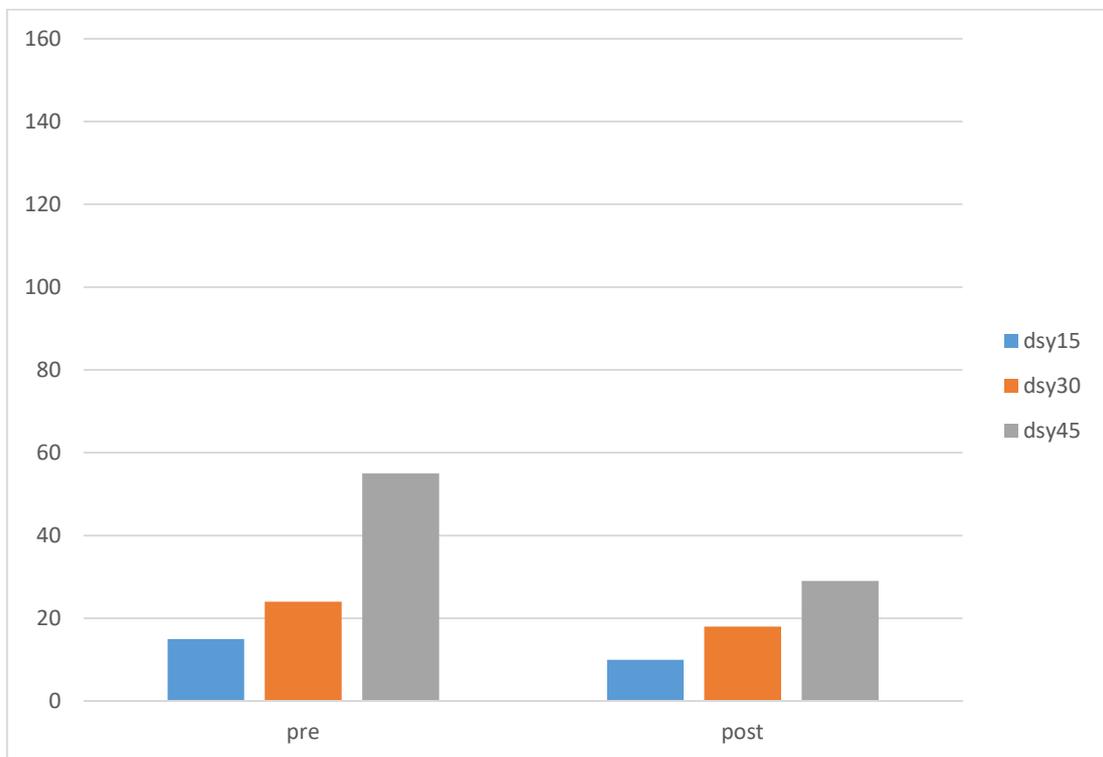
Este aumento menos que proporcional en el número de líneas, es compatible con la tendencia de concentración/asociación observada hasta ahora en las empresas navieras de las rutas contempladas en estudios previos.

El comportamiento descrito en los párrafos anteriores para el caso general se observa también para el caso de las líneas que incluyen un puerto chileno.

**Figura 6. Número de líneas operativas en todas las rutas**

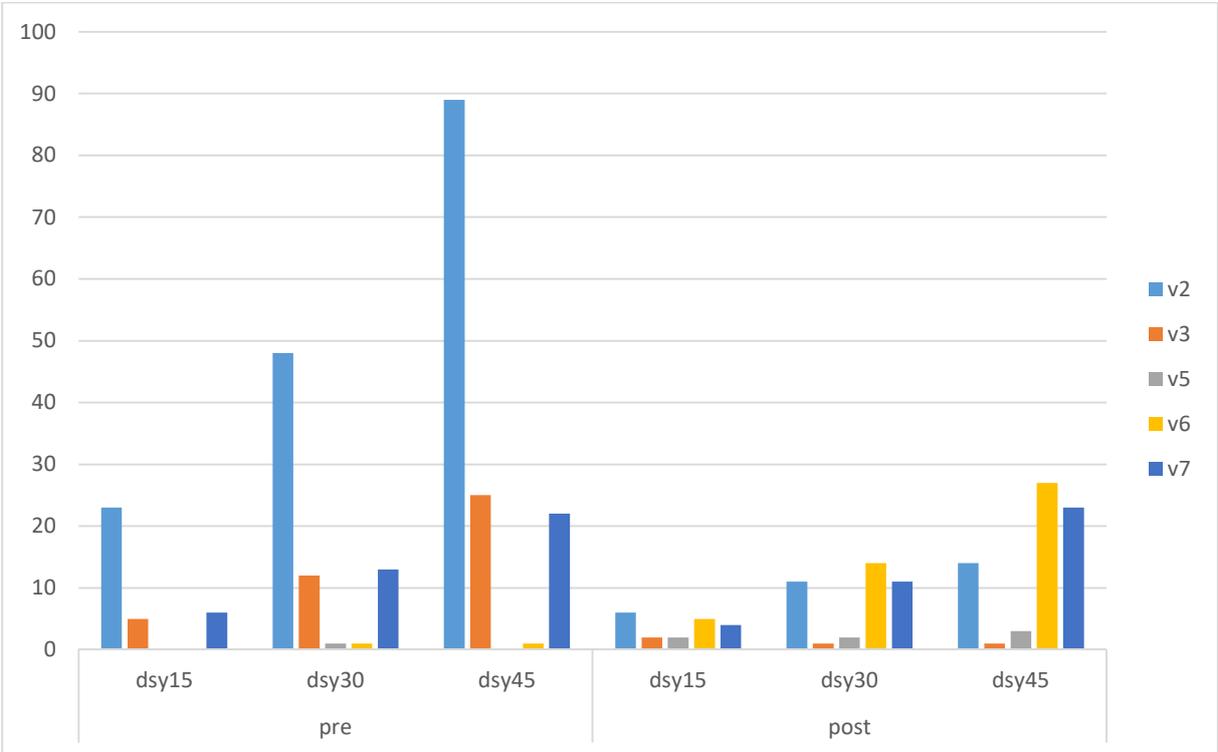


**Figura 7. Número de líneas operativas en las rutas que tocan puertos chilenos**

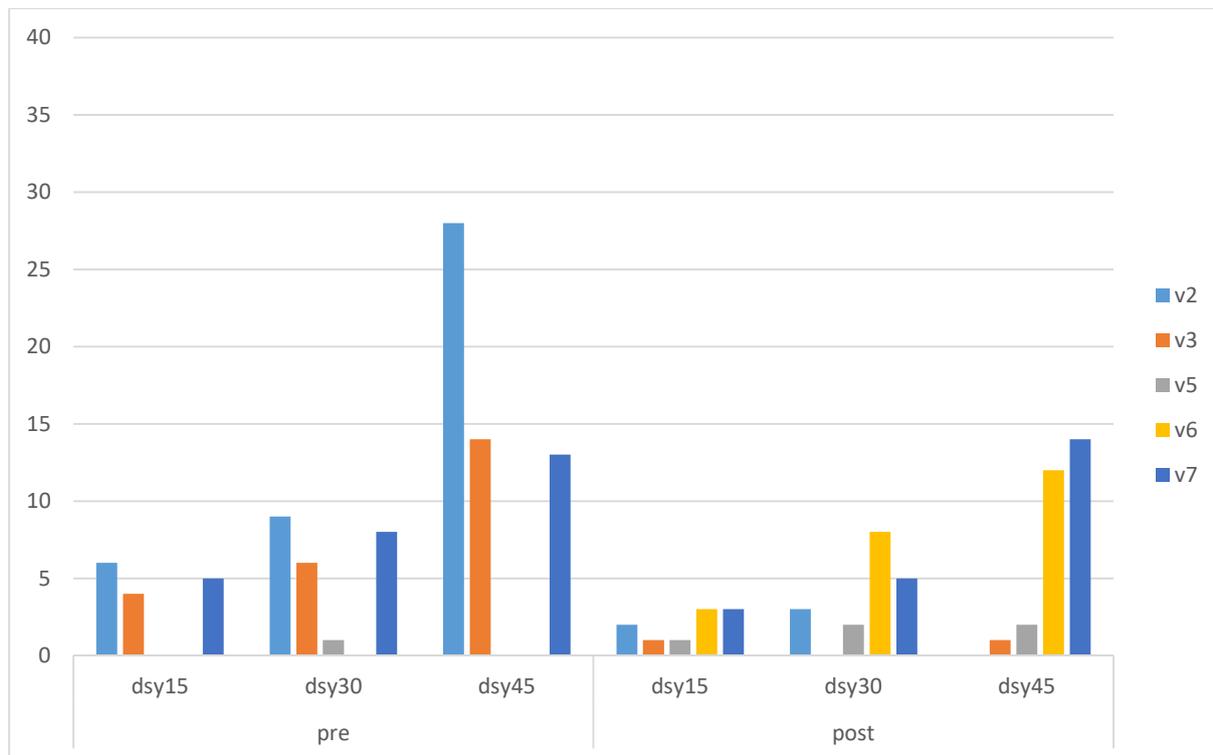


En relación con el tamaño de las naves a utilizar en los diferentes servicios, la Figura 8 y Figura 9, muestran como, el aumento de la demanda se traduce en general en un aumento del número de los buques grandes en todos los escenarios considerados (ver Hoja B1 de la hoja de cálculo). En el caso de Chile ocurre otro tanto. Una vez ampliado el Canal de Panamá, el tipo de buques se concentra casi totalmente en el grupo de mayor tamaño, tanto en el total de rutas como en las rutas que tocan puertos chilenos. La presencia de los buques de 13.000 y 18.000 TEUs es dominante en los escenarios que incorporan la expansión del Canal de Panamá, tanto en general como en el caso de las rutas que incluyen puertos chilenos.

**Figura 8. Número y tipo de buques utilizados en todas las rutas**



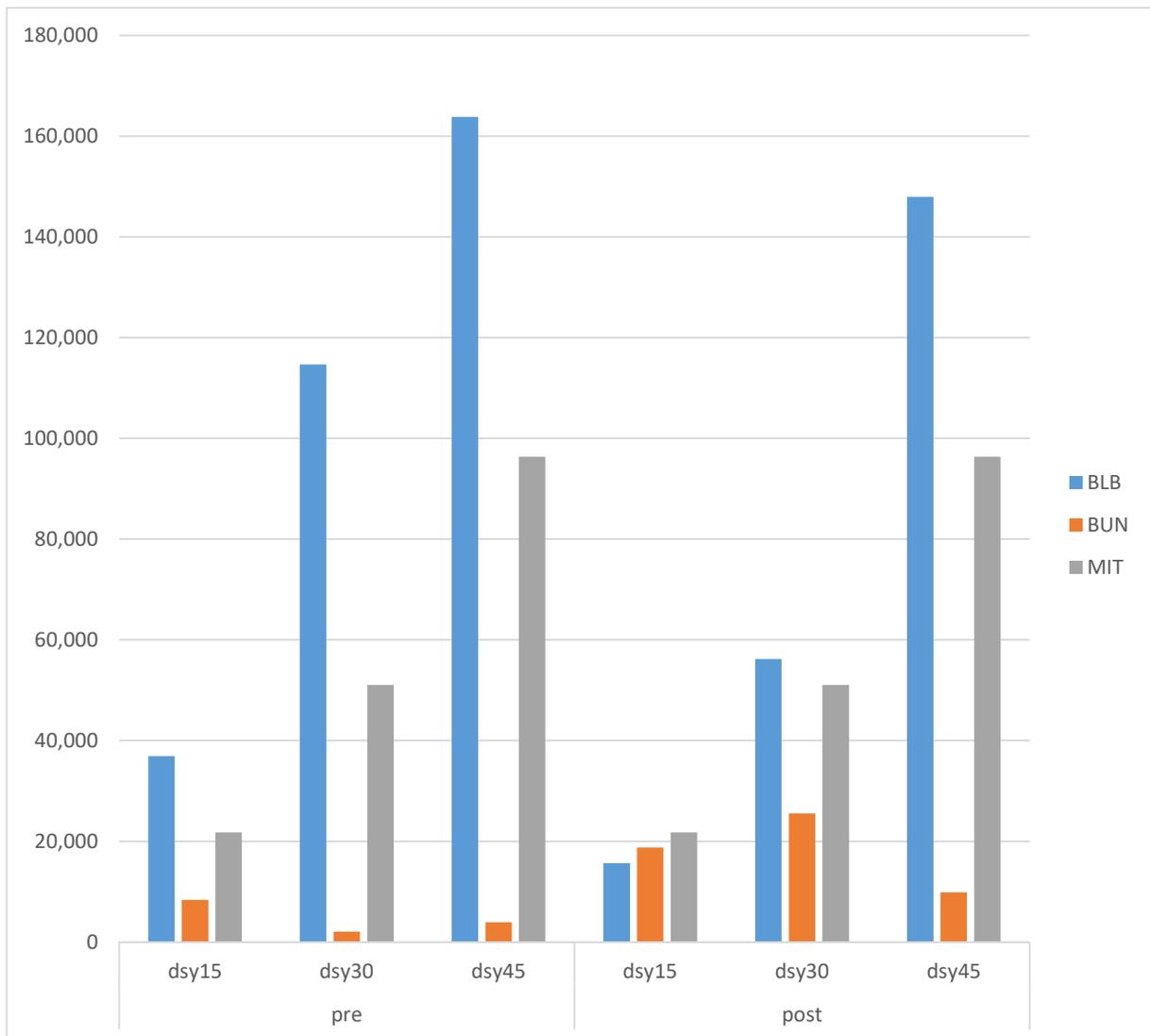
**Figura 9. Número y tipo de buques utilizados en las rutas que tocan Chile**



Otra cuestión a tratar está vinculada al transbordo de contenedores. El diseño de las rutas en el modelo está orientado a facilitar el transbordo de contenedores en los tres puertos identificados inicialmente como importantes puertos potenciales de transbordo en la región, Manzanillo (México), Balboa y Callao. De todas formas, el modelo permite que se efectúen operaciones de transbordo en cualquiera de los puertos de las diferentes rutas contempladas, de ahí que Buenaventura y Manzanillo (Panamá) aparezcan como puertos de transbordo en la solución.

La Figura 10 muestra el número de contenedores transbordados en todas las simulaciones llevadas a cabo.

**Figura 10. TEUs transbordados por puerto**



La primera observación a destacar es cómo la ampliación del Canal de Panamá reduce las necesidades de transbordo en el caso en el que todos los puertos admitan buques de 13.000 y 18.000 TEUs (de pre a post). Esta reducción podría quedar explicada por el hecho de que los buques grandes que atraviesan el Canal de Panamá pueden recalar en todos los puertos de la ruta.

Por otro lado, ambos extremos del Canal de Panamá, Balboa y Manzanillo, aparecen como principales puertos de transbordo. Callao y Manzanillo (México) no resultan ser de interés al mismo tiempo que Buenaventura sí aparece como potencial puerto de transbordo. La alteración de las tarifas modificarían el protagonismo de los diferentes puertos en las operaciones de transbordo.

Todo lo anterior parece indicar que la zona geográfica comprendida alrededor del Canal de Panamá reúne condiciones para el desarrollo de actividades de transbordo. El proyecto del Canal de Nicaragua ofrecería un nuevo punto de transbordo. La disponibilidad de infraestructuras capaces de recibir buques de gran

tamaño, junto con las políticas tarifarias, serían determinantes para elucidar la importancia relativa de cada puerto en estas actividades.

La Figura 11 indica el origen de los TEUs transbordados en cada puerto en los escenarios pre y post año 2045 (T). En el eje horizontal se representan los puertos de transbordo. A diferencia de Buenaventura y Manzanillo (Panamá) en el puerto de Balboa se transbordán contenedores de casi todos los orígenes.

**Figura 11: Origen de los TEUs transbordados en cada puerto**

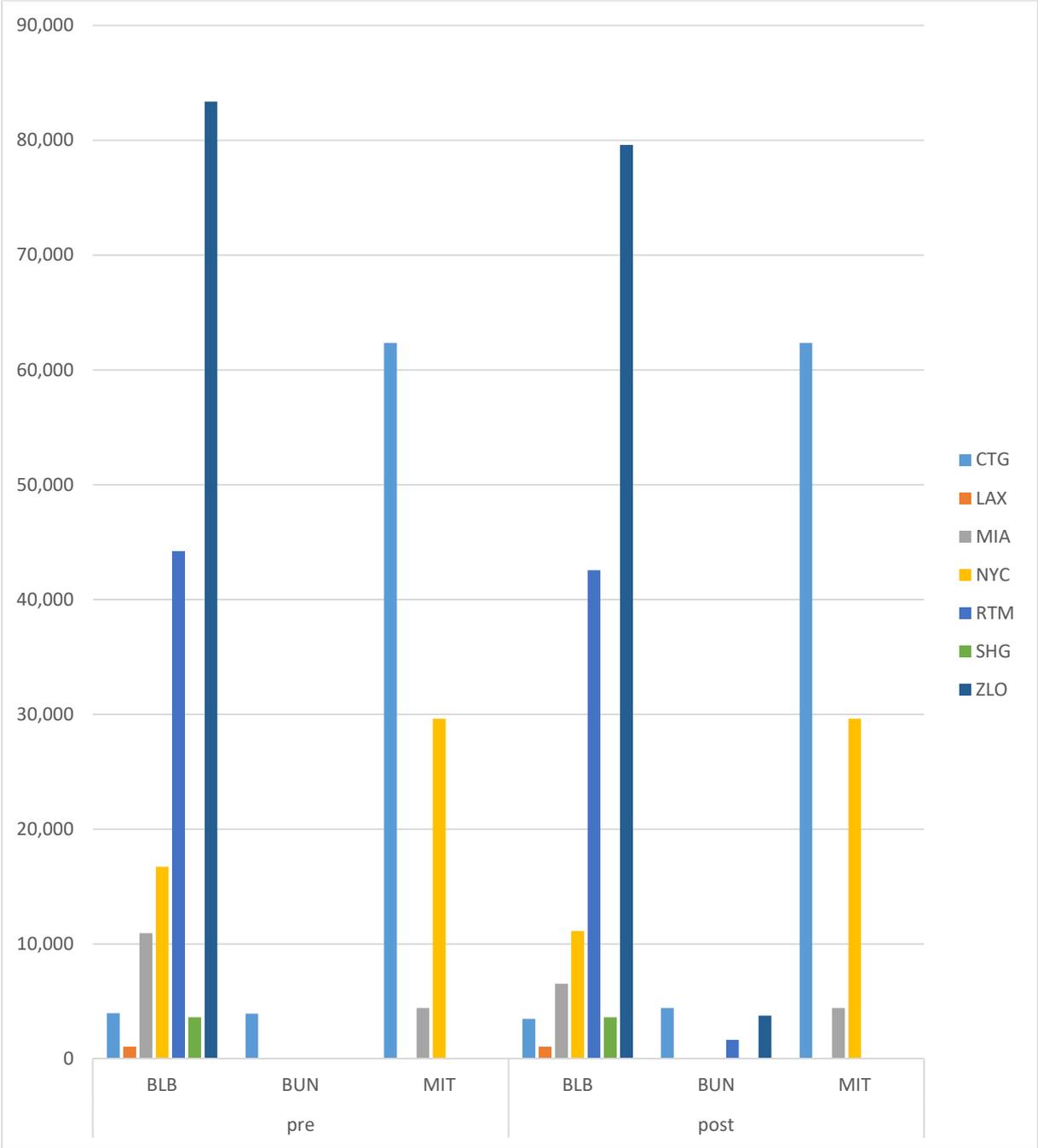


Figura 12. Flujo de contenedores para el año 2015 (T), antes de la expansión del Canal de Panamá, Origen Shanghai, pre

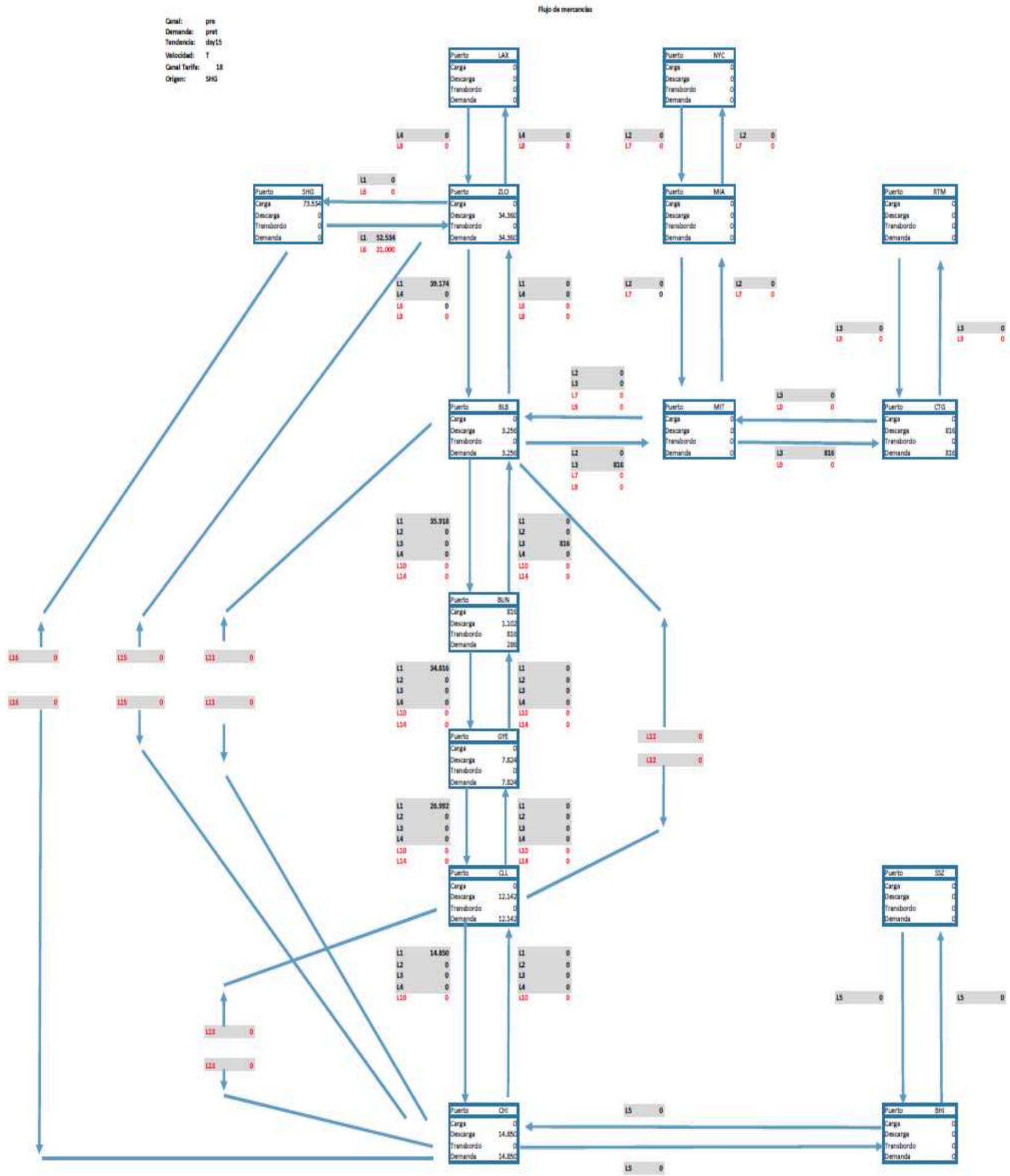
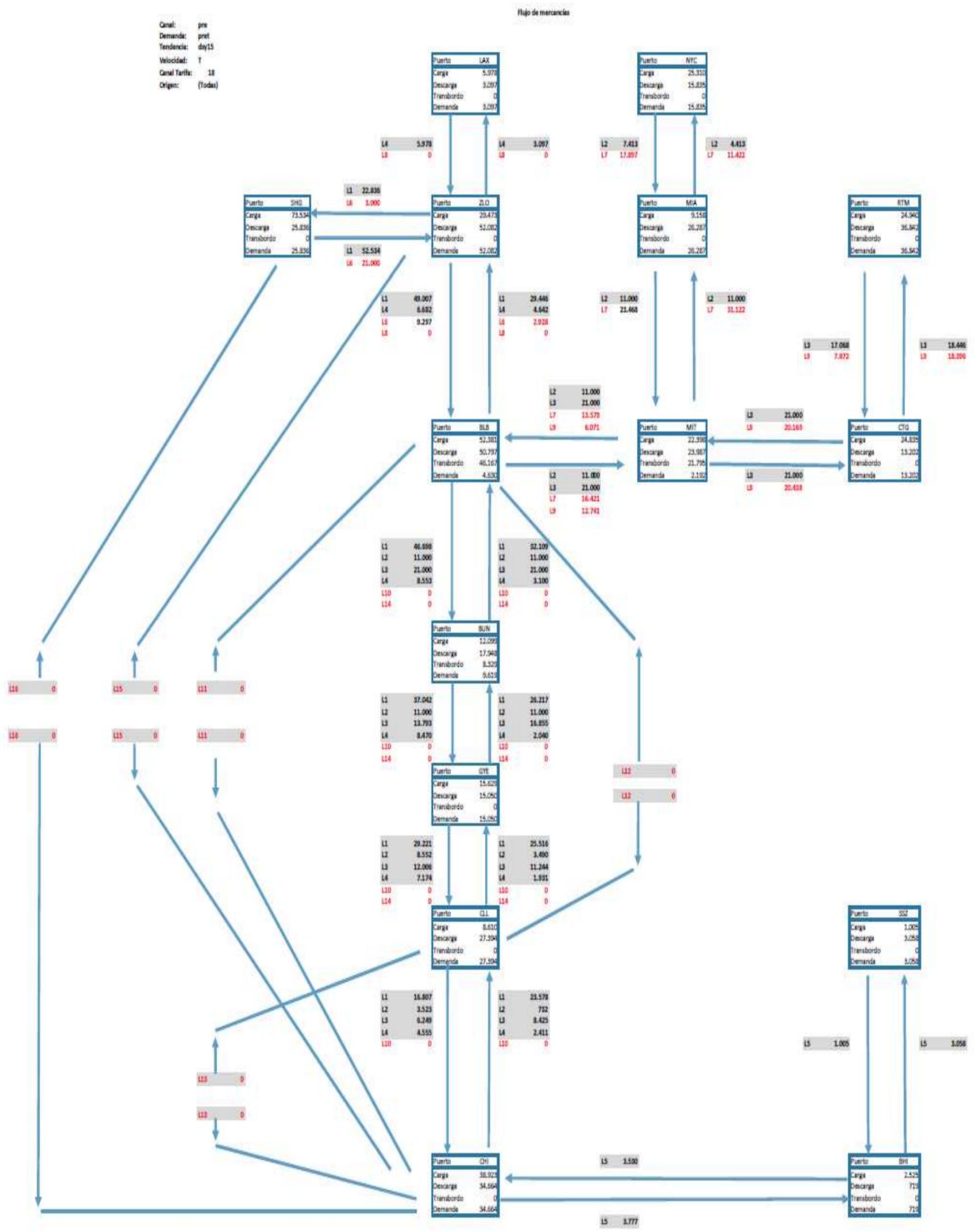


Figura 13. Flujo de contenedores para el año 2015 (T), antes de la expansión del Canal de Panamá, todos los orígenes, pre



Otro requerimiento del proyecto consiste en mostrar los lotes a embarcar en cada uno de los puertos de las rutas consideradas. Para ello se ha preparado una representación gráfica de todas las rutas de la región (ver Hoja "FLOW-GRAPH" en la hoja de cálculo entre F3 y F4).

Dicha representación muestra todos los puertos relevantes e indica todos los movimientos de carga, descarga y transbordo que se producen en cada puerto. También se indican los contenedores que representan la demanda de los países en los que se encuentra situado el puerto.

Además, asociados a todos los arcos de todas las rutas, se muestran los flujos de contenedores que navegan entre los dos puertos de cada arco distinguiendo ambos sentidos.

Este gráfico está vinculado a la información proporcionada por las hojas F2 y F3 de la hoja de cálculo aportada. Por lo tanto, pueden generarse estos gráficos para cada una de las simulaciones previstas.

Como ejemplo de la utilización de esta herramienta de representación de flujos de contenedores, la Figura 12 nos muestra el flujo de contenedores para el 2015 con origen en Shangái, mientras que la Figura 13 muestra el flujo para el mismo año pero incluyendo los contenedores de todos los posibles orígenes. La hoja "F1\_z\_route" de la hoja de cálculo muestra los lotes de contenedores cargados y descargados en cada puerto y línea. La hoja F9\_check\_flow\_route\_p permite revisar los movimientos de todas las líneas y orígenes en cada puerto.

Esta información acerca de los lotes de contenedores cargados, descargados y transbordados en cada puerto, viene complementada por la información acerca de la utilización de la capacidad de los barcos por ruta (B4 de la hoja de cálculo) y por línea (B5 de la hoja de cálculo). La Tabla 22 indica el porcentaje de utilización de la capacidad de todos los barcos que operan en cada uno de los puertos de las diferentes rutas, para el escenario pre, 2030 (T). Puede observarse que el modelo ha planificado el despliegue de las flotas aprovechando la capacidad disponible.

**Tabla 22. Utilización de la capacidad disponible en los puertos de cada ruta (%)**

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
<b>Ruta1</b>	100	100	100	87	58	4	59	68	81	95	62	52		
<b>Ruta2</b>	86	100	100	100	14	14			43	100	100	100	100	19
<b>Ruta3</b>	80	100	100	100	90	78	41	45	64	100	100	100	100	98
<b>Ruta4</b>	36	52	92	96	67	54	20	17	26	28	41	19		
<b>Ruta5</b>	49	40	13	46										
<b>Ruta6</b>	98	51	13	7										
<b>Ruta7</b>	55	78	51	59	100	41								
<b>Ruta9</b>	47	96	43	68	97	81								
<b>Ruta12</b>	63	0												
<b>Ruta16</b>	96,59	73,25												

### **3.7 Conclusiones**

Las principales conclusiones alcanzadas en este capítulo se pueden resumir como sigue:

- Los tres objetivos básicos del proyecto, estimar los servicios que atenderán la demanda proyectada, predecir el tamaño de las naves que se utilizarán en los diferentes servicios, y mostrar los lotes a embarcar en cada uno de los puertos de las rutas consideradas, han quedado cubiertos mediante la aplicación del modelo diseñado para tal fin. La precisión con la que han sido obtenidas las soluciones permiten responder a las cuestiones planteadas de forma fiable.
- Todas las simulaciones indican que la incorporación de buques de gran tamaño (hasta 18.000 TEUs) generaría reducciones en costes de funcionamiento de las navieras, por lo que cabe esperar un aumento de su utilización en el futuro, siempre que se den las condiciones de infraestructura (construcción de nuevos puertos o ampliación de los existentes) y tarifarias para ello.
- En general, el aumento de la demanda implica el incremento de las líneas que se operan. Sin embargo, el incremento del número de líneas que operarían con buques de gran tamaño explica la significativa reducción en

el coste por contenedor movido. En cualquier caso, el incremento del número de líneas que operarían con buques de gran tamaño justificaría la adecuación de la infraestructura portuaria a tales circunstancias.

- Para una misma demanda, la ampliación del Canal de Panamá favorece una reducción en el número de líneas activas y un aumento en la utilización de buques de gran dimensión. Este descenso en el número de líneas es compatible con la tendencia de concentración/asociación observada hasta ahora en las empresas navieras de las rutas contempladas en estudios previos.
- Del análisis efectuado se deduce la relevancia potencial de las actividades de transbordo. Se confirma la importancia de los puertos del Canal de Panamá y surge el puerto de Buenaventura como otra opción a tener en cuenta, siempre que cuente con las infraestructuras necesarias. Por otro lado, puertos como el de Callao y Manzanillo (México), fuera del entorno de América Central, parecen ofrecer menos posibilidades de actuar como puertos *hub* en la región. Esta situación se vería claramente afectada por cambios en la estructura tarifaria de los puertos del entorno.
- Los resultados obtenidos indican que la zona geográfica comprendida alrededor del Canal de Panamá reúne condiciones para el desarrollo de actividades de transbordo. El proyecto del Canal de Nicaragua vendría a ofrecer otra posible opción. La disponibilidad de infraestructuras capaces de recibir buques de gran tamaño, junto con las políticas tarifarias serían determinantes para elucidar la importancia relativa de cada puerto en estas actividades. Los operadores chilenos vinculados al tráfico exterior de mercancías deberían tener en cuenta esta circunstancia en la planificación de sus actividades, considerando la posibilidad de estar presentes de forma más o menos directa en las actividades desarrolladas en estos puertos.

## **4 Modelo de identificación de autopistas del mar competitivas en Chile y sus flotas óptimas**

### **4.1 Introducción y Objetivos**

Con la intención de encontrar alternativas para los problemas de congestión de tráfico en las carreteras europeas, la Unión Europea impulsó el transporte marítimo a través del concepto de Autopistas del Mar (Motorways of the Sea; MOs). Esta idea aparece por primera vez en el Libro Blanco del Transporte Europeo en el 2001

como un grupo de puertos y servicios intermodales que eran usados por el transporte marítimo de corta distancia (Short Sea Shipping Transport, SSS) en una zona de la Unión Europea. En el 2003, aceptada la conveniencia de las autopistas del mar para el interés general, la Comisión Europea revisó la extensión de la TEN-T (the Trans-European Transport Network) incluyendo en esta red de transporte a las autopistas del mar. Desde entonces, las autopistas del mar junto con el transporte por carretera, han sido aceptadas firmemente por la comunidad internacional como una alternativa realista para el transporte "puerta a puerta" siendo capaz de responder de manera efectiva a los requisitos sobre transporte y sostenibilidad medioambiental demandados por las sociedades actuales. La aplicación del concepto de Autopista del Mar, como tráfico marítimo de corta distancia integrado en las cadenas intermodales, ha sido analizada en entornos mucho más amplios que el de la Unión Europea, alcanzándose, así, una dimensión eminentemente deslocalizada del concepto (Bendall H. and Brooks M. ,2011, entre otros).

A pesar de que las ventajas de las autopistas del mar están ampliamente reconocidas, y del esfuerzo hecho por muchos países para impulsar su actividad, el éxito alcanzado no ha sido el esperado. Los motivos son varios:

- Se observa que en las zonas donde se apostó por ellas, sorprendentemente importantes fondos públicos fueron reservados para el desarrollo de carreteras e infraestructuras ferroviarias y para financiar sus costes externos, generando de esta manera, un marco de competitividad desequilibrado para las cadenas multimodales con tramos marítimos (Baird, 2007; Gese and Baird, 2013).
- A pesar de la amplia diversidad de los estudios enfocados al impulso de la intermodalidad a través de SSS una hipótesis fue comunmente aceptada: la viabilidad del transporte multimodal estaba basada únicamente en un tipo de buque (ro-ro y ro-pax): tráfico rodado (roll-on roll-off) ya que era asumido que era el transporte más adecuado para la intermodalidad, sin embargo la mayoría de los estudios que soportaban esta afirmación se basaban en conclusiones de análisis cualitativos que no comparaban distintos tipos de buques y los pocos que sí abordaron esta cuestión, aunque centrándose en aspectos puntuales, alcanzaron resultados más favorables para buques portacontenedores (Mbiydzenyuy et al., 2010).
- Las características técnicas y operativas de los buques eran consideradas como parámetros fijos dados por la compañía naviera, es decir, su número y condiciones de servicio eran parámetros discretos.

Como consecuencia de lo anterior, durante estos años, fue una práctica habitual la definición de umbrales de distancias que sugerían una mayor competitividad para la multimodalidad frente a la unimodalidad analizando la actividad de las cadenas intermodales operadas por buques estándar en sus tramos marítimos. Por tanto, se intentaron adaptar las rutas a las flotas en vez de adaptar las flotas a las posibles rutas. Obviamente, esta práctica incumplía la idea ampliamente aceptada de que la competitividad relativa del transporte intermodal frente a la

unimodalidad es el resultado de una combinación de las características técnicas y operativas de los medios de transporte, los requisitos de los cargadores y de la propia carga y finalmente de las características geográficas de las rutas (Baird, 2007; Gesé y Baird, 2013). Esta combinación de variables que definen la competitividad relativa de los medios de transporte debe ser evaluada como un todo (Suárez-Alemán A. et al., 2015) teniendo como consecuencia el desarrollo de patrones de elección modal (Feo M. et al., 2010; Garcia-Menendez y Feo-Valero, 2009).

Por tanto, la responsabilidad de la elección técnica y operativa de las flotas para operar en cadenas multimodales bajo condiciones de autopistas del mar se ha transpasado tradicionalmente a las navieras, es decir a la iniciativa privada, quedando sólo en manos de los analistas las recomendaciones de distancias marítimas y/o terrestres para su implantación.

Como consecuencia de esta realidad, una práctica común de las compañías navieras, con el apoyo de las políticas de algunos países, ha sido la de adaptar las rutas a las flotas existentes (buques convencionales; Bendall and Brooks, 2011; WEST-MOS Project 2005–2008) en lugar de adaptar las flotas a las rutas. El poco éxito de las autopistas del mar puede deberse, en gran parte, a la infravaloración de su viabilidad y del impacto medioambiental que esta forma de actuar implica.

Incluso la "etiqueta verde" de las autopistas del mar está siendo debatida en la actualidad. A pesar de estar ampliamente aceptado que el transporte marítimo es más respetuoso con el medio ambiente que otros modos de transporte en términos de emisión de CO<sub>2</sub> (Hjelle and Fridell, 2012), la comparación no resulta tan favorable cuando el análisis se centra en las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PM (Hjelle and Fridell, 2012; Hjelle, 2010). Esto es especialmente evidente cuando se analizan buques pequeños y rápidos, que son los más adecuados para muchas autopistas del mar (Martínez-López et al, 2015a; Ng.,2009). Este tipo de buques generan más emisiones por tonelada y kilómetro que otros tipos de buques. Como consecuencia, la sostenibilidad medioambiental no es tan evidente en las cadenas multimodales con tramos marítimos.

El papel destacado que están asumiendo las compañías navieras en el éxito de las autopistas del mar junto al hecho de que la responsabilidad de asegurar la sostenibilidad medioambiental de los servicios de transporte, que generalmente implica la implantación de costosas medidas de disminución de las emisiones o la utilización de combustibles costosos, recaigan de nuevo en la decisión de las compañías privadas (Tier II/III standards collected on amendments of Annex VI in the MARPOL, October, 2008) han motivado el principal objetivo de este trabajo: proporcionar resultados y evidencias que ayuden en la toma de decisiones de las compañías navieras cuando se evalúa la posibilidad de operar en rutas marítimas como autopistas del mar integradas en una cadena multimodal.

Dada esta realidad, este estudio pretende soportar la toma de decisión de una compañía naviera que esté analizando la posibilidad de actuar bajo condiciones de autopista del mar en Chile dando respuesta mediante la intermodalidad a las

necesidades de transporte 'puerta a puerta'. Por lo tanto, este informe presenta un modelo matemático de optimización para definir los buques más apropiados, sus flotas y su operación para establecer una autopista del mar particular integrada en una cadena intermodal 'muchos a muchos' (con varios posibles orígenes/destinos finales en tierra). De esta manera se pretende ofrecer soluciones realistas sobre combinación de flota y ruta que superen los puntos débiles identificados en el establecimiento de autopistas del mar de experiencias anteriores (Suárez-Alemán A., et al.2015) de forma que se maximicen las oportunidades de éxito de las cadenas multimodales asegurando su sostenibilidad medioambiental.

Tal y como aseguran Medda y Trujillo (2010), las oportunidades de éxito de la intermodalidad pasan por ofrecer ventajas significativas respecto a la unimodalidad en tiempo y /o coste. Por tanto, el modelo matemático generado deberá ser capaz de evaluar la competitividad relativa en términos de tiempo y coste (por tonelada y viaje) para el transporte intermodal articulado a través de una autopista del mar y su alternativa unimodal (la carretera) pero también evaluar sus ventajas medioambientales. Así, el modelo permitirá comparar los resultados obtenidos sobre competitividad relativa para diferentes posibles autopistas del mar operando con flotas optimizadas, y por tanto poder sugerir la mejor combinación de flota y ruta dados unos orígenes y destinos finales que dicten la cadena intermodal. La optimización será llevada a cabo mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo lo que permitirá definir no sólo las variables técnicas y operativas de la flota (características de arquitectura naval, capacidad de carga, número de buques, velocidad, frecuencia, etc) sino también el tipo de unidades de carga que más favorecerán la intermodalidad.

Consecuentemente, los resultados aquí obtenidos serán de utilidad no sólo para la compañía naviera o para las autoridades portuarias que pretendan incentivar el desarrollo de autopistas del mar entre ellas, sino también para los cargadores que necesiten un servicio de transporte regular con alta frecuencia (por ejemplo, las PYMES).

## **4.2 Motivación**

La necesidad de definir la combinación de ruta marítima y flota más adecuada en Chile para la articulación de autopistas del mar que posibiliten cadenas intermodales surge como consecuencia de la posible creación de un puerto *hub* en la quinta región. La aparición de este gran puerto, previsiblemente centralizará el atraque de los buques de mayor porte que canalizarán en gran medida el tráfico exterior del país. Consecuentemente, será necesario tráfico marítimo de corta distancia que, integrado con el transporte por carretera, de respuesta tanto a las necesidades del transporte de mercancía exterior desde el puerto *hub* a los extremos iniciales y/o finales de las redes de transporte como al transporte interno de mercancías de Chile.

Por tanto, en el caso que nos ocupa, la mercancía a mover desde el puerto *hub* por las autopistas del mar no responde únicamente a cabotaje sino que a este habrá que añadir la mercancía movida por comercio exterior siendo esta última la más significativa en términos de demanda. Dado que la mercancía importada llegará contenedorizada resulta pertinente la utilización de portacontenedores *feeder* para abastecer este tráfico frente a la posibilidad de emplear otro tipo de buques compatibles con el tráfico marítimo de corta distancia.

La efectividad de los dos tipos de buques compatibles con el tráfico marítimo de corta distancia ha sido analizada por diferentes autores en los últimos años (Martínez-López et al, 2015a; Hjelle and Fridell, 2012; Mbiydzennyuy et al, 2010; Usabiaga et al, 2013), y sus resultados son claramente favorables hacia los portacontenedores en términos de coste, como era esperado, pero también en términos de tiempo si las operaciones portuarias resultan eficientes. Pruebas de esta percepción positiva sobre el uso portacontenedores es el número creciente de estudios acerca de la competitividad del transporte de corta distancia que considera los portacontenedores como buques de referencia para este servicio (Ns., 2009, Chang and Chow, 2010, Feng and Chang, 2008). En todos estos estudios, las dimensiones de los buques obtenidas mediante procesos de optimización, 210 TEUs y 19 nudos de velocidad en el caso de (Martínez-López et al, 2015a), o consideradas como las más adecuadas para el análisis, 250 TEUs y 18 nudos en el caso de Ng (2009) o entre 200 y 500 TEUs en el caso de Chang and Chow (2010) son muy diferentes de las que se consideran cuando se utilizan buques convencionales, entre 500 y 2000 TEUs (Ng and Kee, 2008).

Las emisiones por cantidad de carga transportada y por distancia, no solamente varían de manera significativa con el tipo de buque, su tamaño, el tipo de motor o el tipo de combustible (Hjelle and Fridell, 2012), sino también con la configuración de las rutas de las cadenas multimodales. Con respecto a esto, los resultados obtenidos por (Hjelle, 2010) y (Lee et al., 2010) basados en un caso de estudio concreto son especialmente significativas: mientras la cadena multimodal entre París y Trondheim con flotas de buques de tipo ro-ro perdió su condición de sostenible medioambiental frente al transporte unimodal (por carretera); el servicio marítimo entre Keelung y Taichung en Taiwan operada por portacontenedores representaba la alternativa más respetuosa medioambientalmente a su alternativa por carretera. Asimismo, en (Usabiaga et al., 2013) los autores concluyeron que las cadenas de transporte multimodales son más sostenibles desde el punto de vista ambiental que aquellas operadas por camiones cuando un buque de tamaño pequeño (menos de 155 metros de eslora) cubre el tramo marítimo, en este caso la ruta analizada cubría el transporte entre Madrid y Dortmund.

Por otro lado, en el caso que nos ocupa, la mercancía a mover desde el puerto *hub* por las autopistas del mar no responde únicamente a cabotaje sino que a este habrá que añadir la mercancía movida por comercio exterior siendo esta última la más significativa en términos de demanda en Chile. Dado que la mercancía importada llegará contenedorizada resulta pertinente la utilización de

portacontenedores feeder para abastecer este tráfico frente a la posibilidad de emplear otro tipo de buques compatibles con el tráfico marítimo de corta distancia.

Por todo lo anterior el tipo de buque que se optimizará para operar bajo condiciones de autopista del mar en Chile será un portacontenedores.

### **4.3 Situación actual**

Actualmente, a pesar de existir tráfico regular de cabotaje en Chile, equiparable a SSS, no existen líneas regulares de portacontenedores que articulen autopistas del mar integradas en cadenas intermodales. Las autopistas del mar sugeridas deberían ser suficientes no sólo para cubrir las necesidades de transporte del cabotaje actual sino también del comercio exterior generado en zonas fuera del *hinterland* del puerto *hub*. De acuerdo a los datos publicados por el Sistema de Empresas Públicas (SEP) de Chile<sup>21</sup> en el 2014, el índice de contenedorización de la mercancía general para puertos como Arica, Iquique o Antofagasta superan el 70%, por lo que establecer autopistas del mar operadas por portacontenedores parece una posibilidad viable.

Por otro lado, se reconoce que la utilidad de las autopistas del mar responde al interés general cuando el servicio ofertado suministra una frecuencia y carga movida mínima anual. Se tomará como referencia el servicio de transporte mínimo recogido en el acuerdo intergubernamental entre España y Francia para financiar y apoyar el establecimiento de autopistas del mar entre ambos países en su costa atlántica ('Declaration of intentions about Sea Motorways'; CIG, in July 2006;BOE N°92, 2006):

Que la cantidad mínima de unidades de carga movida en 5 años sea 350.000 (70.000 unidades al año) donde los dos primeros años se pide una frecuencia de 4 salidas a la semana por sentido (182 unidades por sentido y día).

Que se muevan 100.000 unidades al año (desde el año 5 al año 10) con una frecuencia en cada dirección y sentido de 7 salidas a la semana (148 unidades por sentido y día).

Que la cantidad mínima total movida en los 10 años sean 850.000 unidades (lo que supondría una cantidad mínima a cargar de 85.000 unidades al año) con una frecuencia de 4 salidas por semana en cada dirección (221 unidades por sentido y día).

Las unidades de carga han de ser unidades transportadas por tierra, se pueden asumir equivalentes a semiremolques de camión.

---

<sup>21</sup> Ministerio de Transporte ([http://www.sepchile.cl/documentacion/estadisticas-portuarias/?no\\_cache=1](http://www.sepchile.cl/documentacion/estadisticas-portuarias/?no_cache=1))

Según lo anterior los viajes anuales que debe ofertar el servicio serán como mínimo entre 4 y 7 salidas a la semana, entre 384 y 672 viajes al año que debe realizar la flota con un movimiento mínimo anual de 85000 unidades de carga (semirremolques de camión), 1.530.000 toneladas, asumiendo 18 toneladas por semirremolque de camión (Directiva Europea 96/53/CE para vehículos) y 12,5 toneladas por TEU (122.400 TEUs o 74.634 FEUs movidos al año). Se ha asumido por tanto, como hipótesis inicial, tasa de ocupación media de los contenedores del 52% respecto a su capacidad neta de carga máxima (23,6 toneladas) planteando, así, una perspectiva conservadora sobre la evaluación de las toneladas mínimas exigidas.

Como primera estimación se comprobará si las necesidades de carga en Chile son tales que alcanzan este mínimo. Para ello habrá que establecer una primera aproximación a las redes de transporte a estudiar. Dada la geografía de Chile y la alta probabilidad de que el puerto *hub* se establezca en San Antonio o en Valparaíso (en el centro del país), resulta necesario considerar el establecimiento de dos posibles autopistas del mar una que comunique el puerto *hub* con el norte (MOs norte) y otra con el sur (MOs sur).

El objetivo de seleccionar una autopista del mar en el norte y otra en el sur responde al interés de centrar los esfuerzos de inversión en un único puerto central en Chile y establecer autopistas del mar con los puertos más convenientes en el norte y sur que garanticen rutas intermodales competitivas operando con flotas optimizadas. Como consecuencia de este análisis para la selección de rutas óptimas para el establecimiento de autopistas del mar, se ha asumido que toda la fuerza exportadora/importadora de la zona (norte o sur) y la totalidad de su capacidad productiva para cabotaje será transportada a través de cada uno de los puertos evaluados.

Los puertos seleccionados como candidatos para establecer autopistas del mar con el puerto *hub* han sido:

- Norte: Arica, Iquique, Angamos y Antofagasta
- Sur: San Vicente, Coronel y Puerto Montt

Los criterios de selección se han basado, además de en la situación geográfica de los mismos, en el volumen de mercancía contenedorizable actualmente movida y como siguiente criterio la conectividad del puerto (Sabonge y Lugo, 2014). Se ha hecho una excepción con Puerto Montt, la razón es su situación geográfica y su movimiento en cabotaje que animan a analizar este puerto con vistas a una futura expansión del mismo a pesar de no estar dotado para el transporte regular de contenedores, por ello haremos un primer estudio (Primera Etapa) donde se tendrá en cuenta dicho puerto; y un segundo estudio, más restringido, donde no se considerará (Segunda Etapa).

Por otro lado, el puerto de Lirquen no será considerado independientemente dada su proximidad geográfica con San Vicente (20 km) y su distancia a los principales núcleos urbanos de la región (equivalente a la de San Vicente). Consecuentemente

los resultados obtenidos de las redes articuladas a través de San Vicente serán muy similares a los obtenidos a través de Lirquen. Por tanto, sólo se estudiará como muestra el puerto de San Vicente si bien se tendrá en cuenta la mercancía movida por Lirquen para determinar la capacidad de carga de la flota que que abastecerá el sur del país. Lo mismo ocurrirá con el puerto de Mejillones, excesivamente próximo a Angamos aunque con movimiento más relevante en mercancía de cabotaje que Angamos.

En la Tabla 23 y Tabla 24 se puede encontrar un resumen de los datos facilitados por Directemar en el 2012 (tonelaje por importación y exportación por puerto y tipo de bien y el cabotaje por tipo de bienes según puerto también para el 2012). Se ha asumido que la mercancía general y la refrigerada es susceptible de contenedorización considerando el elevado índice de contenedorización encontrado.

**Tabla 23. Necesidades de transporte actual para líneas MOs**

	<b>Cabotaje (t)</b>	<b>Importación (t)</b>	<b>Exportación (t)</b>	<b>Total (t)</b>
Arica	3.030	145.879	123.320	272.229
Iquique	8.005	71.308	408.945	488.258
Mejillones	243.928	0	222	244.150
Angamos	0	570.598	1.576.985	2.147.583
Antofagasta	576	254.348	1.224.927	1.479.851
<b>total Puertos Norte</b>	255.539	1.042.133	3.334.399	<b><u>4.632.071</u></b>
Lirquen	3.015	61.068	3.143.269	3.207.352
San Vicente	189.854	562.984	3.517.887	4.270.725
Coronel	3.030	301.317	2.110.181	2.414.528
Puerto Montt	942.980	23.218	315	966.513
<b>total Puertos Sur (Primera Etapa)</b>	1.138.879	948.587	8.771.652	<b><u>10.859.118</u></b>
<b>total Puertos Sur (Segunda Etapa)</b>	195.899	925.369	8.771.337	<b><u>9.892.605</u></b>

**Tabla 24. Estimación de necesidad de servicio de transporte anual para líneas MOs en cada sentido**

	<b>Norte-Sur&amp;Centro(Exportaciones+cabotaje) (t)</b>	<b>Sur&amp;Centro-Norte (Importaciones+cabotaje) (t)</b>
Arica	124.835	147.394
Iquique	412.948	75.311
Mejillones	122.186	121.964
Angamos	1.576.985	570.598
Antofagasta	1.225.215	254.636
<b>total Norte</b>	<b><u>3.462.168</u></b>	<b><u>1.169.903</u></b>
	<b>Norte&amp;Centro-Sur (Importaciones+cabotaje) (t)</b>	<b>Sur-Norte&amp;Centro (Exportaciones+cabotaje) (t)</b>
Lirquen	62.576	3.144.777
San Vicente	657.911	3.612.814
Coronel	302.832	2.111.696
Puerto Montt	494.708	471.805
<b>total Sur (Etapa I)</b>	<b><u>1.518.027</u></b>	<b><u>9.341.092</u></b>
<b>total Sur (Etapa II)</b>	<b><u>1.023.319</u></b>	<b><u>8.869.287</u></b>

La Tabla 24 muestra la mercancía de cada puerto evaluado que alimentaría la autopista del mar. En los puertos del norte se embarcaría hacia el puerto *hub* tanto la mercancía que se exporta (comercio exterior) como aquella de cabotaje con destino final el centro y sur del país, mientras que se desembarcaría, proveniente del puerto *hub*, la mercancía que se importa del exterior y la de cabotaje proveniente del sur y centro del País.

Tanto en el norte como en el sur, teniendo en cuenta ambos sentidos, se supera ampliamente las 1.530.000 toneladas anuales mínimas recomendadas para el establecimiento de una autopista del mar, tanto en la Etapa I como en la Etapa II. De hecho, en caso de que la totalidad de la mercancía tenida en cuenta en el análisis fuese contenedorizable, y asumiendo un peso medio por TEU de 12,5t y por FEU de 20,5t la zona norte movería anualmente en la Etapa I: 370.566 TEUs (225.955 FEUs), mientras que la zona sur, movería 868.729,44 TEUs (529.713 FEUs). En la Etapa II: el norte movería lo mismo, 370.566 TEUs (225.955 FEUs), mientras que la zona sur, movería 791.408,4 TEUs (482.566,098 FEUs).

Es de destacar el desequilibrio manifiesto en las posibles líneas, pero éstas deben ser abastecidas por la capacidad de la flota considerando el sentido más exigente de la ruta, esto es, la exportación más cabotaje tanto en los puertos del sur (sentido sur-norte; Etapa I 747.287 TEUs o 455.663FEUs; Etapa II: 709.542 TEUs

o 432.648 FEUs ) como en los del norte (Etapa I y Etapa II: sentido norte-sur; 276.973 TEUs o 168.886 FEUs).

Por otro lado dos puertos serán aceptados como candidatos a *hub*: Valparaíso y San Antonio. Por tanto, se analizarán todas las posibles autopistas del mar que unan cada posible puerto *hub* con cada puerto candidato para la zona norte y para la zona sur, asumiendo que en cada zona todas las rutas candidatas deberán tener capacidad para responder a las necesidades totales de tráfico de la zona.

Para establecer las rutas multimodales es necesario determinar los centros generadores/receptores de mercancía en tierra que serán asumidos como extremos finales de ruta. Como primera aproximación al problema (Etapa I) se han asumido como tal las ciudades con sus zonas metropolitanas más pobladas para cada zona (Observatorio Urbano del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Gobierno de Chile):

Dada la distancia de La Serena y Rancagua a los posibles puertos *hub* podrían asumirse como extremos de ruta alcanzables por el *hinterland* del puerto *hub*, así que esta posibilidad será analizada en una segunda etapa del estudio. Por tanto en la Etapa II, se tomarán como extremos de ruta:

- Zona Norte: Iquique, Antofagasta
- Zona Centro: Santiago, Valparaíso y San Antonio en caso de que este sea el puerto *hub*; La Serena y Rancagua
- Zona Sur: Concepción y Temuco

Por tanto las rutas a analizar son:

- **Etapa I**

- Valparaíso/destinos en el NORTE:

- Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*)-Valparaíso-Puertos del norte-Ciudades del norte (Iquique, Antofagasta y La Serena):

- Valparaíso-Arica
- Valparaíso-Iquique
- Valparaíso-Angamos
- Valparaíso-Antofagasta

- Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaíso, puerto *hub*)- Ciudades del norte(Iquique, Antofagasta y La Serena):

- Valparaíso/destinos en el SUR:

- Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*)-Valparaíso-Puertos del sur-Ciudades del sur (Rancagua, Concepción y Tamuco):

- Valparaiso-San Vicente-Talcahuano
  - Valparaiso-Coronel
  - Valparaiso-Puerto Montt
- Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)-Valparaiso- Ciudades del sur(Rancagua, Concepción y Tamuco)
- San Antonio/destinos en el NORTE:
  - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)-San Antonio-Puertos del norte-Ciudades del norte(Iquique, Antofagasta y La Serena):
    - San Antonio-Arica
    - San Antonio -Iquique
    - San Antonio -Angamos
    - San Antonio -Antofagasta
  - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)-San Antonio- Ciudades del norte(Iquique, Antofagasta y La Serena)
- San Antonio/destinos en el SUR:
  - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)-San Antonio -Puertos del sur-Ciudades del sur(Rancagua, Concepción y Tamuco):
    - San Antonio -San Vicente-Talcahuano
    - San Antonio -Coronel
    - San Antonio -Puerto Montt
  - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)- San Antonio - Ciudades del sur(Rancagua, Concepción y Tamuco)
- **Etapa II**
  - Valparaiso/destinos en el NORTE:
    - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaiso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-Valparaiso- Puertos del norte-Ciudades del norte (Iquique y Antofagasta):
      - Valparaiso-Arica
      - Valparaiso-Iquique
      - Valparaiso-Angamos
      - Valparaiso-Antofagasta

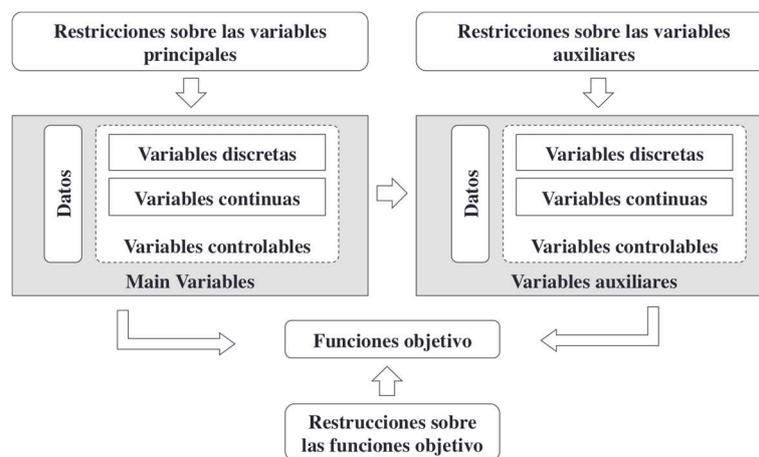
- Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)- Ciudades del norte (Iquique y Antofagasta).
- Valparaiso/destinos en el SUR:
  - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaiso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-Valparaiso- Puertos del sur-Ciudades del sur (Concepción y Tamuco):
    - Valparaiso-San Vicente-Talcahuano
    - Valparaiso-Coronel
  - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-Valparaiso- Ciudades del sur(Concepción y Tamuco).
- San Antonio/destinos en el NORTE:
  - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)-San Antonio- Puertos del norte- Ciudades del norte(Iquique y Antofagasta):
    - San Antonio-Arica
    - San Antonio -Iquique
    - San Antonio -Angamos
    - San Antonio -Antofagasta
  - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*)-San Antonio- Ciudades del norte(Iquique y Antofagasta).
- San Antonio/destinos en el SUR:
  - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaiso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-San Antonio - Puertos del sur-Ciudades del sur(Concepción y Tamuco):
    - San Antonio -San Vicente-Talcahuano
    - San Antonio -Coronel
  - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales(Santiago, Valparaiso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)- San Antonio - Ciudades del sur(Concepción y Tamuco).

## 4.4 Modelo

La definición del modelo consta de dos etapas: la definición del modelo matemático capaz de simular las características técnicas y operativas de la flota actuando en cadenas intermodales y la definición del marco de optimización para la resolución del modelo matemático.

Desde un punto de vista matemático el modelo está constituido por tres elementos: las variables, las funciones objetivo y las restricciones (ver Figura 14). Al mismo tiempo, las variables son divididas en tres tipos de acuerdo a sus roles en el proceso de optimización: los casos (variables discretas), variables continuas y los datos (variables no controlables, *inputs* impuestos por un escenario específico de análisis). Además se pueden distinguir dos tipos de variables según su naturaleza: variables auxiliares, relativas a las características de ingeniería y arquitectura naval y las variables principales que son aquellas relacionadas directamente con las funciones objetivo. El cálculo de las primeras es necesario, junto con el cálculo de las segundas, para determinar las funciones objetivo (ver Figura 14).

**Figura 14. Integración de elementos en el modelo de optimización variables**



Las variables y sus relaciones nos permitirán simular diferentes escenarios que se construirán con las posibles rutas (sus puertos), flotas y unidades de carga.

### 4.4.1 Formulación

#### 4.4.1.1 Flotas, unidades de carga, rutas y puertos

La primera parte del modelo está centrada en el diseño de buques portacontenedores desde un punto de vista técnico y operativo, para ello se ha seguido el modelo desarrollado por (Martínez-López et al., 2015<sup>a</sup>). De acuerdo a

este, el cálculo de las características técnicas de los buques está basado en las expresiones publicadas por diferentes autores (Lamb, 2004; Watson, 2002, etc). La arquitectura de los buques ha sido definida por: la eslora ( $L$ ), la manga ( $B$ ), el puntal ( $D$ ), el calado ( $T$ ), el francobordo ( $FB$ ), el arqueo ( $GT$ ), el volumen de carena ( $\nabla$ ) el peso muerto ( $\Delta$ ), la velocidad ( $VB$ ), la potencia propulsora ( $PB$ ), la capacidad real de carga del buque ( $G_p; \forall p \in PP$ ), y la posible instalación de *bow thrusters* ( $MMb; \forall b \in BB$ , entre otros (ver Figura 15 y anexo)). Dada la importancia de la competitividad en términos de tiempo para este tipo de tráfico, la definición de la disposición de cámara de máquinas es calculada por el modelo considerando distintas combinaciones posibles (más allá de las convencionales), de tal manera se optimizará el tipo de maquinaria propulsora ( $TME_e; \forall e \in EE$ ), el número de motores o turbinas ( $NME_i; \forall i \in I$ ), el tipo de propulsor ( $TP_h; \forall h \in H$ ) y el número de líneas de ejes ( $NSL_n; \forall n \in N$ ; ver anexo).

El modelo de diseño propuesto fue validado a través de su aplicación a buques reales con dimensiones entre 85 y 200 metros de eslora entre perpendiculares (Martínez-López et al., 2015a) y los resultados alcanzados fueron muy cercanos a la realidad. El diseño correcto del buque junto con su número ( $NB$ ), determina los costes de capital (Grosso et al., 2010) por la construcción de cada buque ( $CC$ ) o su flete, además el número total de viajes anuales de la flota ( $N_{trips}$ ) y la edad de los buques ( $E_q; \forall q \in Q$ ) resulta esencial para evaluar correctamente la competitividad de las cadenas multimodales porque influyen directamente en los costes fijos y variables que junto con los costes de capital determinarán el flete mínimo requerido.

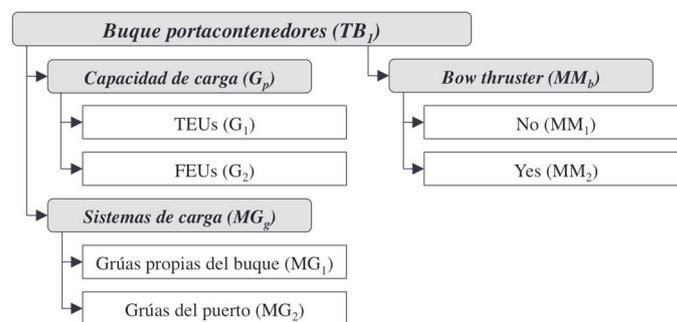
La caracterización de las cadenas intermodales fuerza no sólo a considerar las características de las posibles unidades de carga que son compatibles con los portacontenedores ( $PP = \{1, \dots, p\}$ ) junto con su peso ( $P_p; \forall p \in PP$ ), TEUs y FEUs, sino también los camiones que los transportarán en los tramos por carretera de las cadenas multimodales o en la alternativa del transporte por carretera. Teniendo en cuenta el peso asumido para la carga (12,5t y 20,5t respectivamente) el camión considerado fue un tráiler de carga general 'tractor semiremolque plano' (Según 'Análisis económico del transporte de carga nacional' publicado por la subsecretaría de transportes del Gobierno de Chile en el 2009): con 40 toneladas de máxima carga bruta y 25 t de máxima carga neta (420 CV). Se trata de un vehículo de cinco ejes, clasificado como 'vehículo articulado' (Directiva 96/53/CE) y como categoría N<sub>3</sub>, vehículo pesado (HDV > 12t, Directiva 2007/46/CE). A pesar de que el camión considerado será el mismo para el transporte unimodal que para el transporte multimodal, para todos los casos de carga ( $PP = \{1, \dots, p\}$ ), la carga neta transportada por el camión será aquella correspondiente a la unidad de carga considerada ( $P_p; \forall p \in PP$ ).

Desde un punto de vista medioambiental, las sucesivas normativas Europeas que progresivamente restringieron las emisiones de los vehículos desde el 1995 (Directiva 91/542/EEC), clasificaron a través del tiempo los vehículos de carga como Euro-I, Euro-II, ..., Euro-IV, siendo esta clasificación la más reconocida en

cuanto a tecnología de reducción de emisiones. De acuerdo a la infografía del transporte por carretera de Chile del 2013 (INE, Chile, 2013) el 76% de los camiones que circulaban por el País tenía menos de 10 años y la mayoría eran semirremolques. Consecuentemente se asumirá (con una postura conservadora) que los camiones representativos en Chile y que serán empleado como 'modelo' de este estudio contarán con tecnología Euro III (implantada en camiones fabricados a partir del 2000).

Además de la determinación de la capacidad de carga de los buques en unidades ( $G_p; \forall p \in PP$ ), la selección de una unidad de carga particular también determina los posibles sistemas de manejo de la carga utilizados ( $MG_g; \forall g \in GG$ ) (ver Figura 15).

**Figura 15. Variables principales discretas (Elaboración Propia)**



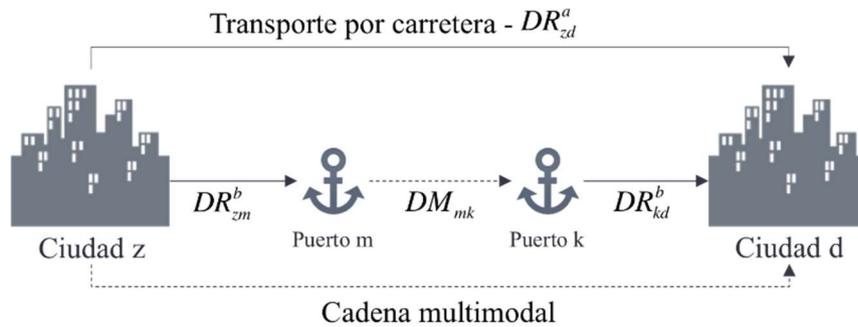
Las características de estos sistemas son críticas para la evaluación de la competitividad de las cadenas intermodales en términos de tiempo (tiempos de carga/descarga) y, desde luego, son altamente dependientes del puerto considerado para el estudio. En este modelo se asumirá para los contenedores, como hipótesis inicial, una ruta directa de carga en puerto (Daganzo, C., 2005), esto es, operaciones de carga bajo condiciones ideales (mínimos tiempos de tránsito dentro de puerto para los contenedores Martínez-López et al., 2015c).

Respecto a la selección de la ruta, el modelo 'muchos a muchos' (con varios tramos capilares, tramos por carretera y un tramo troncal, tramo marítimo, para las cadenas intermodales) resulta ser altamente adaptable a la mayoría de rutas reales 'puerta a puerta' (Daganzo, 2005). Por esta razón, esta aproximación, matemáticamente definida por Martínez-López et al., 2015c (ver también Martínez-López et al., 2015b), ha sido considerada para la generación de rutas en este trabajo. En el modelo propuesto (ver figura 3), los puertos de origen ( $M=\{1,..,m\}$ ) y destino ( $K=\{1,..,k\}$ ), los orígenes ( $Z=\{1,..,z\}$ ) y destinos en tierra de las cadenas intermodales ( $DD=\{1,..,d\}$ ) junto con su posibilidad de ser seleccionados entre otros como origen inicial ( $X_z; \forall z \in Z$ ) y destino final ( $X_d; \forall d \in DD$ ) ha sido convenientemente integrado (ver anexo 1).

Una vez las rutas han sido definidas (Martínez-López A. et al., 2015b, Martínez-López et al., 2015c), estas son caracterizadas por el uso de las distancias marítimas que se corresponden con las autopistas del mar ( $DM_{mk}; \forall m \in M \wedge \forall k \in K$ ),

el tramo troncal y las distancias por carretera entre puntos extremos y puertos (los tramos capilares:  $DR_{zm}^b; \forall z \in Z \wedge m \in M$  and  $DR_{kd}^b; \forall k \in K \wedge d \in DD$ ) y la distancia de acarreo por carretera ( $DR_{zd}^a; \forall z \in Z \wedge d \in DD$ ).

**Figura 16. Modelo many to many para la generación de rutas**



Aun cuando las variables manejadas en la integración del modelo son numerosas (150 teniendo en cuenta los datos) sólo las variables principales han resultado ser independientes (siete variables, ver Figura 14). Estas variables principales coinciden con los parámetros iniciales que son normalmente solicitados por los armadores durante la fase de diseño conceptual del buque (Lamb, 2004).

Estas son, variables discretas que reflejan el conjunto de posibilidades evaluadas para su selección, como la edad de los buques ( $Q=\{1,..q\}$ ), el grupo de posibles unidades de carga compatibles ( $PP=\{1,..p\}$ ) y los posibles sistemas de manejo de la carga  $GG=\{1,..g\}$ ). Además también existen variables continuas tales como, la capacidad de carga de los buques ( $G_p; \forall p \in PP$ ), la velocidad de los buques (VB) y el número de buques en la flota (NB) y la posible instalación de *bow thusters* ( $BB=\{1,..b\}$ ) (ver anexo).

El modelo matemático ha sido desarrollado teniendo en cuenta que el principal objetivo de este análisis es encontrar la opción de flota que articula la cadena intermodal más competitiva en comparación a la alternativa unimodal en términos de coste, tiempo y costes externos (emisiones medioambientales). Estos tres términos serán, por tanto, las funciones objetivo del proceso de optimización y serán descritas en las siguientes secciones.

#### 4.4.1.2 Maximización de la diferencia en términos de coste

El coste del transporte unimodal (CU) y del transporte multimodal (CMU) es medida por tonelada y por viaje, esto es transporte 'puerta a puerta' entre cada par de nodos z y d,  $\forall z \in Z, \forall d \in DD$  en cada dirección. F1 representa la primera función objetivo del modelo (ver expresión 1) en la búsqueda de la flota óptima para la autopista del mar. La cadena intermodal operada por una flota optimizada debe implicar una ventaja en términos de costes si es comparada con la alternativa

de la carretera ( $CU \gg CMU$ ). Esta ventaja será más favorable a la multimodalidad cuando la diferencia en términos de costes entre los distintos modos de transporte se maximice.

$$F1 = \max(CU - CMU) \quad (1)$$

El coste del acarreo terrestre ( $CU$  en la ecuación 2) es dependiente de la distancia real cubierta, por lo tanto, en su cálculo las probabilidades de los diferentes extremos de rutas de emitir y/o recibir mercancía ( $X_{jz}^c$  and  $X_d$ ), las distancias ( $DR_{zd}^a$ ) entre cada posible origen ( $\forall z \in Z$ ) y destino ( $\forall d \in DD$ ) y los costes relativos a las emisiones contaminantes ( $RE$ ) deben ser considerados. Es necesario tener en cuenta que las probabilidades relativas a los orígenes están altamente condicionadas por el escenario evaluado ( $\forall c \in ST$ ) y por el sentido del transporte ( $\forall j \in J$ ), especialmente en líneas desequilibradas.

Los mismos parámetros, pero relativos a los tramos capilares de la red, acarreos terrestres en las cadenas intermodales (ecuaciones 4 y 5). Adicionalmente el precio unitario (€/km) del transporte por carretera ( $CK_p^d; \forall p \in PP \wedge \forall d \in DIS$ ) que es relativo al tipo de carga es definido considerando la máxima velocidad permitida para los camiones ( $VT$ , en km/h), y obviamente es considerada para el cálculo del coste del transporte unimodal (ecuación 2) y los costes de los tramos terrestres del sistema multimodal (ecuaciones 4 y 5). Este valor también es dependiente del número de conductores necesarios para la conducción del camión ( $\forall d \in DIS$ )

$$CU = RE + \left( \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_{jz}^c \times X_d \times DR_{zd}^a) \right) \times \left( \frac{1}{2} \right) \times \frac{CK_p^d}{P_p} \quad \forall p \in PP \wedge \forall d \in DD \wedge \forall z \in Z \wedge \forall j \in J \wedge \forall d \in DIS \quad (2)$$

El coste de la multimodalidad (ecuación 3) integra el coste de los tramos capilares ( $CMU_a; \forall a \in A$ , ver Anexo): 'puerta a puerto' ( $CMU_1$ ) y 'puerto a puerta' ( $CMU_2$ ) por carretera y el tramo marítimo ( $CMU_3$ ). En todos ellos se han incluido los costes externos debido a su impacto medioambiental:  $RE_a, \forall a \in A$  (ver ecuaciones 4-6). Estos costes son definidos en la sección 4.1.4. El coste del tramo troncal de la cadena intermodal (tramo marítimo, ver ecuación 6) ha sido calculado a través de un modelo de costes (Martínez-López et al., 2015c) que integra todos los costes necesarios ( $CT_c; \forall c \in C$  ver Anexo) para la evaluación del flete mínimo requerido (para alcanzar el punto de equilibrio). Ya que estos costes son anuales, aparte del peso por unidad de carga ( $P_p; \forall p \in PP$ ), es necesario tener en cuenta los viajes anuales de la flota ( $N_{trips}$ ) para obtener la expresión adecuada (euros por viaje y tonelada) en la ecuación ( $CMU_3$ ). Estos costes integran la estructura tradicional de costes en el transporte marítimo: costes de capital, costes variables y fijos (Perez-Mesa et al., 2010; Martínez-López et al., 2015c; Martínez-López et al., 2015a).

$$CMU = \sum_{a=1}^a CMU_a \quad \forall a \in A \quad (3)$$

$$CMU_1 = RE_1 + \left( \sum_{j=1}^i \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times DR_{zm}^b) \right) \times \left( \frac{1}{2} \right) \times \frac{CK_p^d}{P_p} \quad \forall p \in PP \wedge \forall m \in M \wedge \forall z \in Z \wedge \forall j \in J \wedge \forall d \in DIS \quad (4)$$

$$CMU_2 = RE_2 + \left( \sum_{d=1}^d (X_d \times DR_{kd}^b) \right) \times \frac{CK_p^d}{P_p} \quad \forall p \in PP \wedge \forall k \in K \wedge \forall d \in DD \wedge \forall d \in DIS \quad (5)$$

$$CMU_3 = RE_3 + \left( \frac{1}{G_p \times P_p \times Ntrips} \right) \times \sum_{c=1}^{12} CT_c \quad \forall p \in PP \quad (6)$$

Las expresiones mostradas anteriormente (ecuaciones de la 2 a la 6) representan los costes totales relativos a los sistemas de transporte incluyendo los costes externos generados por las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera ( $RE_a, \forall a \in A$ , definidos en la sección 4.1.4). Debido al impacto de los costes externos en la calidad de vida de los ciudadanos, la ventaja medioambiental ha sido considerada una función objetivo ( $F3$ ) adicional e independiente en la búsqueda de la flota óptima para la operación de autopistas del mar. Este hecho ha motivado la consideración particular del modelo medioambiental.

#### 4.4.1.3 Maximización de la diferencia en términos de tiempo

Una de las conclusiones más ampliamente aceptadas sobre el análisis de la competitividad del transporte intermodal frente a la carretera alcanzada por los estudios de elección modal (Feo et al., 2010; Garcia-Menendez and Feo-Valero., 2009) es que el punto más débil de la intermodalidad es el tiempo invertido en el transporte. A pesar de que estos estudios también determinan la importancia relativa del tiempo frente al coste como función de las características de la carga (Nellthorp et al., 2001) y del momento del estudio (Mangan et al., 2001), la evaluación de la competitividad del transporte intermodal en términos de tiempo resulta ser fundamental para el transporte 'puerta a puerta'. Por esa razón el proceso de optimización de la flota debe estar orientado a asegurar una mayor competitividad de la multimodalidad en términos de tiempo:  $F2$  (ver ecuación 7, donde tanto el tiempo invertido en el transporte unimodal  $TVU$ , como el tiempo invertido en la multimodalidad  $TVM$  son considerados en horas por viaje. Así cuanto mayor sea el valor de la función objetivo, mayor será la ventaja en tiempo asociada a la multimodalidad.

$$F2 = \max(TVU - TVM) \quad (7)$$

La estimación del tiempo dedicado al transporte unimodal ( $TVU$ , ecuación 8) y a los tiempos de acarreo terrestre ( $TVM_1, TVM_2$ , ecuaciones 10 y 11 respectivamente) recogen la normativa de Chile sobre la máxima velocidad del camión (Ley Nº 18.290, Art. 145), y el máximo tiempo de conducción por día 16 horas con dos conductores (24 horas se corresponderán con 16 horas de transporte efectivas cuando es obligatorio el uso de dos conductores) y descansos de dos horas cada 5 horas de conducción (artículo 25 bis del Código del Trabajo;

Dirección de trabajo del gobierno de Chile, Noviembre 2015). Con el objetivo de establecer una estimación realista, se ha introducido una hora hora adicional por día conducido para reflejar los posibles incidentes sucedidas durante la conducción. En estas ecuaciones el primer miembro muestra información sobre las horas reales invertidas en periodos enteros de 16 horas (incluyendo paradas inesperadas) mientras que el segundo miembro refleja el tiempo conducido el último día de trayecto (menos de 16 horas)

$$TVU = (1/2) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_{jz}^c \times X_d) \times \left[ \frac{\left\lfloor \frac{DR_{zd}^a}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zd}^a}{VT}}{16} \right] \times 24 + \left[ \left( \frac{\left\lfloor \frac{DR_{zd}^a}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zd}^a}{VT}}{16} \right) - \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{DR_{zd}^a}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zd}^a}{VT}}{16} \right\rfloor \right] \times 16 \quad (8)$$

En paralelo, el tiempo de transporte multimodal (*TVM*) integra la duración del tramo marítimo y los tramos por tierra (ecuación 9, ver anexo). El tiempo invertido en el tramo marítimo (*TVM<sub>3</sub>*, ecuación 12) ha sido tomada como la suma del tiempo de navegación (*TVB<sub>1</sub>*), dependiente de la velocidad del buque *VB* y de la distancia marítima ( $DM_{mk}; \forall m \in M \wedge \forall k \in K$ , ver ecuación 13), el tiempo de maniobra en puerto (*TVB<sub>2</sub>*) y el tiempo de atraque (*TVB<sub>3</sub>*) que, este último incluye los tiempos de carga y descarga. El tiempo de maniobra en puerto (*TVB<sub>2</sub>*, ver ecuación 14), es altamente dependiente del uso obligatorio de práctico (*TS<sub>1</sub>*) y servicios de remolque (*TS<sub>2</sub>*) requerido por las autoridades portuarias y el tiempo de amarre (*TS<sub>3</sub>*)

$$TVM = \sum_{a=1}^a TVM_a \quad \forall a \in A \quad (9)$$

$$TVM_1 = (1/2) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times \left[ \frac{\left\lfloor \frac{DR_{zm}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zm}^b}{VT}}{16} \right] \times 24 + \left[ \left( \frac{\left\lfloor \frac{DR_{zm}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zm}^b}{VT}}{16} \right) - \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{DR_{zm}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zm}^b}{VT}}{16} \right\rfloor \right] \times 16 \quad (10)$$

$$TVM_2 = \sum_{d=1}^d (X_d \times \left[ \frac{\left\lfloor \frac{DR_{kd}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{kd}^b}{VT}}{16} \right] \times 24 + \left[ \left( \frac{\left\lfloor \frac{DR_{kd}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{kd}^b}{VT}}{16} \right) - \left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{DR_{kd}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{kd}^b}{VT}}{16} \right\rfloor \right] \times 16 \quad (11)$$

$$TVM_3 = \sum_{s=1}^s TVB_s \quad \forall s \in SS \quad (12)$$

$$TVB_1 = DM_{mk} / (VB \times 1.85)^{22} \quad \forall m \in M \wedge \forall k \in K \quad (13)$$

$$TVB_2 = \sum_{w=1}^w TS_w \quad \forall w \in WW \quad (14)$$

<sup>22</sup> 1,85km=1 nudo náutico

#### 4.4.1.4 Maximización de la diferencia en costes medioambientales

Debido al daño mediambiental a la sociedad, la diferencia entre los costes externos asociados con las emisiones contaminantes para los sistemas de transporte serán evaluadas, también, como la tercera función objetivo del problema de optimización:  $F3$  (ver ecuación 15). Para ello se han seguido las recomendaciones de Maibach et al. (2008), Ntziabchristos y Samaras, (2012) y Jiang et al. (2014), entre otros, para la estimación de los costes externos debidos a la contaminación del aire. Así estos costes se han calculado, para todos los sistemas de transporte evaluados, como la multiplicación de los costes unitarios de contaminantes por los coeficientes de emisión (ver ecuaciones 19, 21, 23 para el tramo marítimo, 28 para el transporte unimodal y 31 y 34 para los acarreos por carretera, ver además el anexo).

Con el objetivo de establecer una comparación razonable entre los dos sistemas de transporte alternativos para evaluar sus costes externos en términos de impacto mediambiental, debemos evaluar las mismas emisiones contaminantes para todos los medios de transporte. Siguiendo las recomendaciones de la Unión Europea sobre contaminación medioambiental (Regulación (EC) No 595/2009 del Parlamento Europeo), los principales gases contaminantes son:  $CO$ ,  $NO_x$  y partículas  $PM_{2.5}/PM_{10}$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ , HCT y HCNC, pero excluyen las emisiones de  $SO_2$ . Sin embargo, el alto contenido en azufres de los combustibles (Wang and Cobett, 2007), ha motivado numerosos trabajos en los últimos años sobre emisiones contaminantes de azufre en el transporte marítimo. Como resultado, se han impuesto con carácter obligatorio, estrictas medidas de regulación para las emisiones de azufres en el fuel utilizado por los buques (MARPOL, Anexo VI revisado por la IMO-International Maritime Organization-). Por otro lado, resulta esencial la evaluación del cambio climático (Jiang et al. 2014, Maibach et al., 2008; Ntziabchristos and Samaras, 2012) debido a los gases de efecto invernadero emitidos por los sistemas de transporte ( $CO_2$ ). Así, finalmente, debido a la importancia de los costes marginales externos (Vanherle and Delhaye, 2010), los contaminantes medioambientales considerados en este estudio son ( $U=\{1, \dots, u\}$ ):  $SO_2$ ,  $NO_x$ , y partículas  $PM_{2.5}$ , además de las emisiones en  $CO_2$ .

De la misma manera, los mismos costes unitarios para las emisiones ( $CF_{suFV}; \forall S \in SS \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$  -€ por kg of contaminante) han de ser aplicados (Maibach et al., 2008) para todos los tipos de vehículos de transporte (ver ecuaciones: 19, 21, 23, 28, 31 y 34). Los valores de los costes unitarios son dependientes del país ( $FF=\{1, \dots, f\}$ ) y tipo de zona ( $V=\{1, \dots, v\}$ ) donde se detectan las emisiones: zona metropolitana o zona urbana. Además, los costes unitarios relativos a la operación en una región marítima, navegación libre ( $CF_{1u}; \forall u \in U$  ver ecuación 19), son independientes del tipo de zona y país. Los valores de estos costes fueron recogidos para distintos países por HEATCO (Bickel et al., 2006) for  $PM_{2.5}/PM_{10}$  y por CAFE (Holland et al., 2005) para el resto de contaminantes.

$$F3 = \max(RE - MUE) \quad (15)$$

Tanto los costes externos del transporte unimodal ( $RE$ , ecuación 26) y los costes externos del transporte multimodal ( $MUE$ , ecuación 16) han sido considerados en euros por tonelada y viaje. Por esa razón la ecuación considera las variables: unidades de carga (su número y peso  $G_p, P_p; \forall p \in P$ ) y el número anual de viajes  $N_{trips}$ . La expresión relativa al transporte multimodal integra los costes del tramo marítimo y los costes del acarreo terrestre ( $RE_a; \forall a \in A$ , ver ecuaciones 16, 17, 29 y 32, ver también Anexo)

$$MUE = \sum_{a=1}^a RE_a \quad \forall a \in A \quad (16)$$

$$RE_3 = CEM / (G_p \times P_p \times N_{trips}) \quad \forall p \in PP \quad (17)$$

$$CEM = \sum_{s=1}^3 CEM_s \quad \forall s \in SS \quad (18)$$

El método seguido para el cálculo de los costes relativos a las externalidades en el tramo marítimo ( $RE_3$ ) está basado en una modificación de la estimación de los costes externos medioambientales para las emisiones de buques de Jiang et al., (2014, ver también Jiang y Kronbak, 2012). De acuerdo a este método, el cálculo debe tener en cuenta tres etapas con respecto al impacto en la salud de la población de la emisiones por transporte marítimo ( $CEM_s; \forall s \in SS$ ): navegación libre, maniobrabilidad y atraque ( $SS = \{1, \dots, s\}$ ).

Los factores de emisión para los buques ( $EG_{su}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U$  ver ecuaciones 19, 21 y 23) han sido obtenidas de las hojas de cálculo de emisiones para buques portacontenedores desarrolladas por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) y por la Universidad del Sur de Dinamarca (SDU) (<https://www.shipowners.dk/en/services/beregningsvaerktoejer/>). Esta herramienta está basada en un modelo de cálculo (Kristensen, 2012; Kristensen and Lützen, 2012), capaz de facilitar los coeficientes de emisión de los buques en base a sus características técnicas y operativas. Para la correcta integración de la hoja de cálculo de emisiones en el modelo matemático presentado en este trabajo, se han asumido ciertas hipótesis iniciales sobre el tipo de motor de los buques y su tecnología: media velocidad y motores *two-tier* operados con MDO (Marine Diesel Oil), por tanto, no se ha contemplado la instalación de *scrubbers* ni tampoco otras posibles alternativas para la reducción de emisiones.

Las expresiones 19, 20 y 22 presentan el cálculo de los costes anuales (€) de las externalidades para las diferentes etapas del tramo marítimo. Aun cuando todas ellas responden a la misma estructura: la suma de los costes para los diferentes contaminantes ( $U = \{1, \dots, u\}$ ), esto es la multiplicación de los factores de emisión por los costes unitarios; los factores de emisión ( $EG_{su}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U$ ) son medidos en diferentes unidades: kg /milla náutica para navegación libre (ver ecuación 19) y kg/h para maniobras (ecuación 21) y atraque (ecuación 23). Esto motiva que la ecuación 19 considere la variable de la distancia marítima ( $DM_{mk}; \forall m \in M \wedge \forall k \in K$ ), mientras que las restantes integran las variables de tiempo ( $TVB_2$  y  $TVB_3$ ).

Obviamente los países considerados para los costes unitarios y la definición de coeficientes de emisión en maniobras y operaciones de atraque serán únicamente aquellos de los puertos de origen y destino ( $FF=\{1, \dots, f\}$ ).

$$CEM_1 = \sum_{u=1}^4 (EG_{1u} \times DM_{mk} \times 0.54 \times CF_{1u}) \times N_{trips}^{23} \quad \forall m \in M \wedge \forall k \in K \quad (19)$$

$$CEM_2 = 0.5 \times N_{trips} \times \sum_{f=1}^2 (CEM_{2f})^{24} \quad (20)$$

$$CEM_{2f} = \sum_{u=1}^4 (EG_{2u} \times TVB_2 \times CF_{2ufv}) \quad \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (21)$$

$$CEM_3 = 0.5 \times N_{trips} \times \sum_{f=1}^2 (CEM_{3f}) \quad (22)$$

$$CEM_{3f} = \sum_{u=1}^4 (EG_{3u} \times TVB_3 \times CF_{3ufv}) \quad \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (23)$$

Los puertos serán considerados zonas metropolitanas ( $v=1$ ) cuando la población de su hinterland ( $PV_m; \forall m \in M; PV_k; \forall k \in K$ ) supere los 0.5 millones de habitantes (ver 24 y 25; Holland et al., 2005; Bickel et al., 2006). En caso contrario, el puerto será considerado zona urbana ( $v=2$ ).

$$CF_{2ufv} = \begin{cases} PV_m \geq 0.5; PV_k \geq 0.5 & CF_{2uf1} \\ PV_m < 0.5; PV_k < 0.5 & CF_{2uf2} \end{cases} \quad (24)$$

$$CF_{3ufv} = \begin{cases} PV_m \geq 0.5; PV_k \geq 0.5 & CF_{3uf1} \\ PV_m < 0.5; PV_k < 0.5 & CF_{3uf2} \end{cases} \quad (25)$$

Ntziabchristos and Samaras (2012) propusieron tres métodos de cálculo para determinar los coeficientes de emisión de los vehículos de transporte por carretera ( $EGU_{uf}; \forall u \in U \wedge \forall f \in FF$ ) -gramos de contaminante por kilo de fuel consumido-: Tier 1, Tier 2 y Tier 3, siendo el último preferible. Después de la evaluación de los métodos sugeridos se decidió descartar el tercer método porque su aplicación requiere conocer con gran nivel de detalle la ruta, la operación en ella y el vehículo. Lo mismo ocurre con el método Tier 2 para el cálculo de los coeficientes de emisión de  $NO_x$  y  $PM_{2.5}$ , y para el cálculo de los coeficientes de  $CO_2$  resulta útil sólo para camiones rígidos.

Dadas las unidades de los coeficientes de emisión para el transporte por carretera (ver Anexo) y su dependencia con los países afectados por el transporte, para calcular los costes externos (ver ecuaciones 26, 29 y 32), es necesario considerar

<sup>23</sup> 1/ milla náutica =  $0,54 \times 1/\text{km}$

<sup>24</sup> Como  $TVB_2$  y  $TVB_3$  (ver ecuaciones 21 y 23) incluyen, de manera agragada, el tiempo invertido en las operaciones de salida y de llegada en puerto (práctico, operaciones de remolque y actividades de carga/descarga respectivamente), es necesario aplicar un factor corrector (0,5) que considere los diferentes países afectados ( $\forall f \in FF$ ) en el cálculo de  $CEM_2$  y  $CEM_3$  (ecuaciones 20 y 22).

no sólo el consumo de fuel de los camiones ( $FC_p$ ;  $\forall p \in PP$ - gr fuel/km-), sino también la distancia cubierta por ellos (ver ecuaciones 28, 31 y 34) y observar su distribución entre los diferentes países: porcentaje de la distancia por carretera que pertenece a cada país en el transporte unimodal ( $X_f$ ;  $\forall f \in FF$ ), los tramos de carretera desde los puertos de origen ( $X_{fz}$ ;  $\forall f \in FF \wedge \forall z \in Z$ ) y aquellos a los puertos de destino ( $X_{fd}$ ;  $\forall f \in FF \wedge \forall d \in DD$ ).

Después del análisis de los métodos previos, en este estudio se calcularán los coeficientes de emisión relacionados con el azufre ( $SO_2$ ) considerando la información de Tier 1 sobre el contenido en azufre del fuel junto con el consumo de fuel facilitado en Tier 2, por categoría de vehículo y su carga neta máxima. Además, para el cálculo de los coeficientes de emisión para  $NO_x$ ,  $PM_{2.5}$  y  $CO_2$  fueron calculados de acuerdo al procedimiento recogido en Tier 1 que considera los valores para los distintos tipos de camiones y tecnología medioambiental hasta Euro III (este estudio ha considerado los valores mínimos correspondientes a la tecnología Euro III).

$$RE = CET \times (1 / P_p) \quad \forall p \in PP \quad (26)$$

$$CET = \sum_{u=1}^u CET_u \quad (27)$$

$$CET_u = \sum_{f=1}^f (CF_{2uf2} \times FC_p \times EGU_{uf} \times 10^{-6} \times X_f \times \frac{1}{2} \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_{jz}^c \times X_d \times DR_{zd}^a)) \quad \forall p \in PP \wedge \forall u \in U \quad (28)$$

$$RE_1 = CETT_1 \times (1 / P_p) \quad \forall p \in PP \quad (29)$$

$$CETT_1 = \sum_{u=1}^u CETT_{1u} \quad (30)$$

$$CETT_{1u} = \frac{1}{2} \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times DR_{zm}^b \times FC_p \times 10^{-6} \times \sum_{f=1}^f (CF_{2ufv} \times X_{fz} \times EGU_{uf})) \quad \forall p \in PP \wedge \forall u \in U \quad (31)$$

$$RE_2 = CETT_2 \times (1 / P_p) \quad \forall p \in PP \quad (32)$$

$$CETT_2 = \sum_{u=1}^u CETT_{2u} \quad (33)$$

$$CETT_{2u} = \sum_{d=1}^d (X_d \times DR_{kd}^b \times FC_p \times 10^{-6} \times \sum_{f=1}^f (CF_{2ufv} \times X_{fd} \times EGU_{uf})) \quad \forall p \in PP \wedge \forall u \in U \quad (34)$$

Con la intención de simplificar el cálculo, los costes unitarios empleados en los serán equivalentes a aquellos considerados en las operaciones de maniobra en puerto para el tramo marítimo ( $s=2$ ;  $CF_{2ufv}$  ver ecuaciones 31 y 34), además las zonas de tránsito serán asumidas como zonas urbanas ( $v=2$ ;  $CF_{2uf2}$ ) para el transporte unimodal (ver ecuación 28). Por otro lado, los tramos por carretera del transporte multimodal serán considerados zonas metropolitanas (ver ecuación 35) cuando la distancia total de los acarreo capilares es menor que el radio metropolitano (RM) y la población media de los diferentes orígenes ( $PVO_z$ ;  $\forall z \in Z$ ) y destinos ( $PVD_d$ ;  $\forall d \in DD$ ) supera 0.5 millones de habitantes y/o la población del hinterland ( $PV_m$ ;  $\forall m \in M$ ;  $PV_k$ ;  $\forall k \in K$ ) sea mayor que 0.5 millones de habitantes. En caso contrario la zona será considerada urbana ( $v=2$ ).

$$\begin{array}{l}
\left[ \begin{array}{l}
\left( \frac{1}{2} \right) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times DR_{zm}^b) \leq RM \\
\sum_{d=1}^d (X_d \times DR_{kd}^b) \leq RM
\end{array} \right. \\
\left. \begin{array}{l}
\left( \frac{1}{2} \right) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times PVO_z) \geq 0.5 \\
PV_m \geq 0.5 \\
\sum_{d=1}^d (X_d \times PVD_d) \geq 0.5 \\
PV_k \geq 0.5
\end{array} \right.
\end{array} \quad \begin{array}{l}
CF_{2uf1} \\
CF_{2uf1} \\
CF_{2uf1} \quad (35) \\
CF_{2uf1}
\end{array}$$

CF<sub>2ufv</sub> =

CF<sub>2uf2</sub>

#### 4.4.1.5 Las restricciones del modelo

En la Tabla 25 se muestran las restricciones impuestas al modelo.

**Tabla 25. Restricciones del modelo para etapa I y II**

RR1			$T < 10$
RR2			$FB > FB_{\text{mínimo}}$
RR3			$G_{p(\text{definitivo})} \geq G_{p(\text{diseño})}$
RR4			$B \geq 13,56$
RR5	$D \geq$		7,15 si $PB \leq 33,794$
			$5 \times 10^{-4} \times PB - 5,52$ si $33.794 < PB \leq 53.600$
RR6			$4,94 < L/B < 7,50$
RR7			$1,55 < B/D < 2,31$
RR8			$7,85 < L/D < 14,17$
RR9			$2,35 < B/T < 3,20$
RR10			$672 \geq N_{\text{trips}} \geq 384$
RR11			$VB < (3,7 \times \nabla^{0,1667} / 0,514)$
RR12 (etapa I)	$G_p \times N_{\text{trips}} \geq$	MOs (Norte)	370.566; si $G_p = G_1$
			225.955; si $G_p = G_2$
		MOs (Sur)	868.729; si $G_p = G_1$
			529.713; si $G_p = G_2$
RR12 (etapa II)	$G_p \times N_{\text{trips}} \geq$	MOs (Norte)	370.566; si $G_p = G_1$
			225.955; si $G_p = G_2$
		MOs (Sur)	791.408; si $G_p = G_1$
			482.566; si $G_p = G_2$
RR13 (etapa I)	$(G_p/2) \times N_{\text{trips}} \leq$	MOs (Norte)	276.973; si $G_p = G_1$
			168.886; si $G_p = G_2$
		MOs (Sur)	747.287; si $G_p = G_1$
			455.663; si $G_p = G_2$
RR13 (etapa II)	$(G_p/2) \times N_{\text{trips}} \leq$	MOs (Norte)	276.973; si $G_p = G_1$
			168.886; si $G_p = G_2$
		MOs (Sur)	709.542; si $G_p = G_1$
			432.648; si $G_p = G_2$
RR15			$TVB \leq NB \times 12$

Las restricciones de RR1 a RR9 son aplicadas a las variables para asegurar la viabilidad técnica de los buques. Las restricciones RR10, la RR12 la RR13 y la RR15 son necesarias para que la flota alcance la capacidad de carga necesaria que asegure el transporte de la mercancía que actualmente es susceptible de ser contenedorizable (ver sección 3, Tabla 23 y Tabla 24). La restricción RR11 asegura que los buques no alcancen la condición de Buque de alta velocidad (High speed Craft; High-Speed Craft Code MSC 36(63) and SOLAS, chapter X), esta condición

no es deseable por numerosas razones relativas a operatividad y eficiencia de los buques en este tipo de operaciones (Castells i Sanabra, 2009; UK Marine Motorways study, 2002-2003; SPIN-HSV project, 2003-2005)

#### **4.4.1.6 El marco de optimización**

Una vez el modelo matemático ha sido desarrollado, es necesaria la identificación, a través del análisis del problema, del algoritmo de optimización más adecuado para resolverlo. Así, considerando la naturaleza del modelo, se puede concluir que es un problema multiobjetivo, no lineal y con restricciones no lineales. Los algoritmos evolutivos, (EA) son algoritmos metaheurísticos que han demostrado buenos resultados en términos de eficiencia y efectividad en este tipo de problemas. Debido a las características del problema, el algoritmo seleccionado ha sido el NSGA-II (Deb et al., 2002).

### **4.5 Datos**

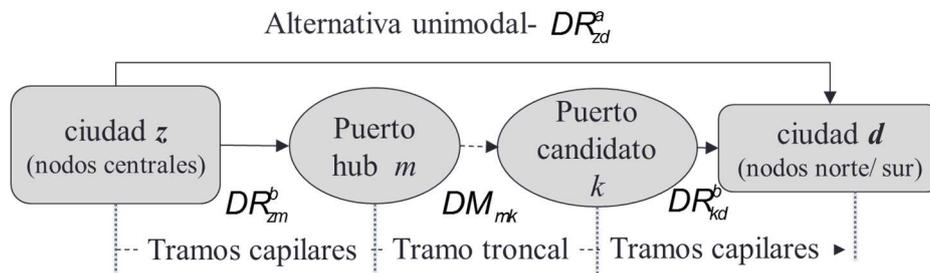
#### **4.5.1 Lógica de las redes de transporte y matrices de distancias**

Dada la formulación anterior, resulta evidente la necesidad de numerosos datos que serán manejados como inputs del sistema.

Las distancias entre puertos han sido obtenidas de la página web <https://www.searates.com/es/reference/portdistance/>, Las distancias por carretera entre nodos y entre nodos y puertos, han sido calculadas mediante google maps pero asegurando que las carreteras seleccionadas fuesen las más apropiadas para el transporte de mercancía por carretera, para ello se ha consultado <http://www.mapas.mop.cl/cc2013/red-vial-2013-cuadernillo.pdf>, publicado por el Ministerio de Obras Públicas de Chile.

Para establecer las cadenas intermodales se han asumido modelos 'many to many' (ver Figura 17) lo que implican varios posibles orígenes (en el norte o en el sur) y varios posibles orígenes y/o destinos en tierra en el centro del país. Las distancias entre estos extremos de ruta y los puertos, se conocen como extremos capilares de la red. Por tanto tendremos extremos capilares centrales y extremos capilares norte, para la Mos norte, y extremos capilares sur, para la MOS sur, que se corresponden con los mayores centros de población. Esta hipótesis se ha tomado considerando que los centros más poblados tradicionalmente agrupan también los principales centros generadores y receptores de mercancía contenedorizable (García-Alonso and Sánchez-Soriano, 2010). Se han considerado por tanto, estos extremos de ruta constantes para todas las posibles autopistas del mar que articulen el tramo troncal de la cadena intermodal.

**Figura 17. Tramos de las cadenas intermodales**



#### 4.5.2 Probabilidades de distribución de mercancía en los nodos

A falta de datos más precisos se ha considerado que el reparto de la mercancía que llega a cada puerto entre sus extremos de ruta en el norte y en el sur también responderán a criterios poblacionales, así para los tramos capilares:

ETAPA I:

- MOs NORTE:
  - Iquique: 214.586 habitantes ( $X_d=X_1=26,95\%$ )
  - Antofagasta: 285.255 habitantes ( $X_d=X_2=35,83\%$ )
  - La Serena: 296.253 habitantes ( $X_d=X_3=37,21\%$ )

Población total de los extremos de ruta en el norte: 796.094 habitantes.

El resto de destinos (los del sur) no serán alcanzados directamente por las cadenas intermodales articuladas a través de las autopistas del mar del norte ( $X_d=X_4=X_5=X_6=0\%$ )

Se asumirá, por tanto, que sólo estos tres extremos de ruta serán los generadores/receptores de la mercancía contenedorizable a transportar en la región, tanto de exportación como de cabotaje hacia el sur y centro del País.

ETAPA II:

- MOs NORTE:
  - Iquique: 214.586 habitantes ( $X_d=X_1=43\%$ )
  - Antofagasta: 285.255 habitantes ( $X_d=X_2=57\%$ )

Población total de los extremos de ruta en el norte, en este caso será: 499.841 habitantes.

El resto de destinos (los del sur) no serán alcanzados directamente por las cadenas intermodales articuladas a través de las autopistas del mar del norte ( $X_d=X_3=X_4=0\%$ )

Se asumirá, por tanto, que sólo estos dos extremos de ruta serán los generadores/receptores de la mercancía contenedorizable a transportar en la región, tanto de exportación como de cabotaje hacia el sur y centro del País.

ETAPA I:

- MOs SUR:
  - Rancagua: 236.363 habitantes ( $X_d=X_4=17,47\%$ )
  - Concepción: 848.023 habitantes( $X_d=X_5=62,69\%$ )
  - Temuco: 268.437 habitantes ( $X_d=X_6=19,84\%$ )

Población total extremos de ruta en el sur: 1.352.823 habitantes

El resto de destinos (los del norte) no serán alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de estas cadenas:  $X_d=X_1=X_2=X_3=0\%$ ) De nuevo se tomarán sólo estos tres extremos de ruta como los generadores/receptores de la mercancía contenedorizable a transportar en la región.

ETAPA II:

- MOs SUR:
  - Concepción: 848.023 habitantes( $X_d=X_3=75,95\%$ )
  - Temuco: 268.437 habitantes ( $X_d=X_4=24,04\%$ )

Población total extremos de ruta en el sur: 1.116.460 habitantes

El resto de destinos (los del norte) no serán alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de estas cadenas:  $X_d=X_1=X_2=0\%$ ) De nuevo se tomarán sólo estos dos extremos de ruta como los generadores/receptores de la mercancía contenedorizable a transportar en la región.

Si bien la definición de las probabilidades de reparto entre los nodos norte y sur resulta sencilla, ya que efectivamente estos se corresponden con los extremos finales o iniciales de ruta, la definición de tal probabilidad para los nodos centrales resulta más complicada.

Tal y como se ha explicado en el apartado 3 (Situación actual), dada la motivación del establecimiento de estas autopistas del mar, estas rutas serán capaces de canalizar la mercancía interna con destino los nodos centrales del país o bien a los nodos norte/sur del país. Si efectivamente el destino final son los nodos centrales del país la cadena intermodal contará con ambas redes capilares, las del norte/sur y las del centro. Sin embargo, si la carga es originada en los nodos del norte, por ejemplo, y tiene como destino final los nodos del sur, la ruta intermodal articulada por el MOs norte tendrá como extremo de ruta final el propio puerto *hub*. Ya que de aquí a través de la MOs sur llegará hasta su destino final. Lo mismo ocurrirá con la mercancía que teniendo su origen en los nodos norteños sea para exportación. Su destino final en la cadena intermodal articulada a través del MOs norte finalizará en el puerto *hub* donde se transbordará a un buque, previsiblemente de mayor tamaño, que transporte la unidad de carga a su destino final. Obviamente esto ocurrirá en ambas MOs y en ambos sentidos. Por tanto esta realidad tiene que ser reflejada en el modelo mediante el reparto de probabilidades entre los extremos de ruta centrales, de manera que, uno de ellos, por los motivos expuestos ha de ser el propio puerto *hub*.

Por tanto, ya que se ha decidido estimar el reparto en base a criterios poblacionales, será necesario estimar una población ficticia para el puerto *hub* en

cada sentido del transporte, para así calcular su probabilidad de ser origen/destino con respecto a los otros nodos centrales.

- **MOS norte:**

- Sentido Norte-Sur:

ETAPA I:

La población ficticia para el puerto *hub* que recibe del norte:  $(PPC1) = \text{población por cabotaje norte-sur (PCNS1)} + \text{población por exportación desde el norte (PEDN1)}$ :

- PCNS1 (población por cabotaje norte-sur): Se asumirá ésta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta sureños (considerados para el MOs sur): 1.352.823 habitantes
- PEDN1: población por exportación desde el norte. Este es un dato no inmediato sino que habrá que estimar considerando la carga contenedorizable (general+refrigerada) por exportación que envían los puertos norteños y transformándola en población. Para ello tendremos en cuenta los datos facilitados por Directemar (tonelaje por exportación por puerto y tipo de bien para el 2012), así los puertos del norte (ver Tabla 23y Tabla 24) exportan 3.334.399t anuales de mercancía contenedorizable.

ETAPA II:

La población ficticia para el puerto *hub* que recibe del norte:  $(PPC1) = \text{población por cabotaje norte-sur (PCNS1)} + \text{población por exportación desde el norte (PEDN1)}$ :

- PCNS1 (población por cabotaje norte-sur): Asumiremos esta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta sureños (considerados para el MOs sur): 1.116.460 habitantes
- PEDN1: Considerando los datos facilitados por Directemar (tonelaje por exportación por puerto y tipo de bien para el 2012), los puertos del norte (ver Tabla 23y Tabla 24) exportan 3.334.399 t anuales de mercancía contenedorizable.

- Sentido Centro-Norte:

ETAPA I:

La población puerto *hub* que envía al norte mercancía será:  $(PPC2) = \text{población por cabotaje sur-norte (PCNS2)} + \text{población por importación hacia el norte (PEDN2)}$ :

- PCNS2 (población por cabotaje centro norte-norte): Asumiremos esta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta norteños: 796.094 habitantes
- PEDN2: población por importación hacia el norte. De acuerdo a directemar (tonelaje por importación por puerto y tipo de bien para el 2012, ver Tabla 23 y Tabla 24) importan 1.042.133t anuales de mercancía contenedorizable.

ETAPA II:

La población puerto *hub* que envía al norte mercancía será: (PPC2)=población por cabotaje sur-norte (PCNS2)+población por importación hacia el norte (PEDN2):

- PCNS2 (población por cabotaje centro-norte): Se asumirá ésta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta norteños: 499.841 habitantes
- PEDN2: población por importación hacia el norte. De acuerdo a Directemar (tonelaje por importación por puerto y tipo de bien para el 2012, ver Tabla 23 y Tabla 24) importan 1.042.133t anuales de mercancía contenedorizable.

Dados los desequilibrios encontrados en carga movida según los sentidos de las rutas (norte-sur y sur-norte), el modelo se ha preparado para que las probabilidades de distribución entre nodos centrales recojan esta realidad ( $X_{jz}^c$ , siendo  $c$  la MOs norte o sur,  $j$  el sentido del transporte norte-sur o sur-norte y  $z$  cada nodo central).

Para los cálculos se tendrá en cuenta los valores de toneladas de tráfico exterior y cabotaje recogidos en las Tabla 23 y Tabla 24, asumiendo equilibrio entre ambos sentidos para el tráfico de cabotaje entre las zonas norte y centro-sur, esto es 127.769 toneladas anuales (255.539/2 t).

Así, para la Etapa I:

El tonelaje anual contenedorizable asumido en dirección norte-sur por cabotaje es de 127.769 toneladas anuales, son enviadas a una población máxima (población del centro y la población del sur): 7.808.668 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de exportación del norte de 3.334.399 t será de 203.782.708 habitantes.

Etapa II:

El mismo tonelaje anual contenedorizable en este caso, son enviados a una población máxima (población del centro y la población del sur): 8.104.921 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de exportación del norte de 3.334.399 t será de 211.514.019 habitantes.

Etapa I:

Por otro lado para la dirección sur-norte, el tonelaje anual contenedorizable movido por el centro y el sur en dirección sur-norte es enviado a una población máxima (población del norte): 796.094 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de importación del norte de 1.042.133 t será de 6.493.222 habitantes.

Etapa II:

Para la dirección sur-norte, el tonelaje anual contenedorizable movido en dirección sur-norte es enviado a una población máxima (población del norte): 499.841 habitantes, la población equivalente que generaría un movimiento de importación del norte de 1.042.133 t será de 4.076.879 habitantes.

Así la población equivalente en el puerto de carga *hub* será:

ETAPAI:

- Dirección Norte-Sur (PCNS1+PEDN1): 1.352.823 habitantes  
habitantes+203.782.708 habitantes=**205.135.531 habitantes**
- Dirección Sur-Norte (PCNS2+PEDN2): 796.094 habitantes  
habitantes+6.493.222 habitantes=**7.289.316 habitantes**

ETAPAI:

- Dirección Norte-Sur (PCNS1+PEDN1): 1.116.460 habitantes  
habitantes+211.514.019 habitantes=**212.630.479 habitantes**
- Dirección Sur-Norte (PCNS2+PEDN2): 499.841 habitantes  
habitantes+4.076.879 habitantes= **4.576.720 habitantes**

Por tanto, las probabilidades de reparto de la carga en los nodos centrales serán:

ETAPA I:

- Norte-Sur (j=1)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^1_{11}= 2,66\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^1_{12}=0,39\%$
  - Puerto *hub*: 205.135.531 habitantes:  $X^1_{13}=96,95\%$
- Sur-Norte (j=2)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^1_{21}=40,97\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^1_{22}=6,00\%$
  - Puerto *hub*: 7.289.316 habitantes:  $X^1_{23}=53,03\%$

El puerto *hub* será Valparaíso o San Antonio.

ETAPA II:

- Norte-Sur (j=1)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^1_{11}=2,56\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^1_{12}=0,37\%$
  - Puerto *hub*: 212.630.479 habitantes:  $X^1_{13}=96,82\%$
  - La Serena: 296.253 habitantes:  $X^1_{14}=0,13\%$
  - Rancagua: 236.363 habitantes:  $X^1_{15}=0,11\%$
- Sur-Norte (j=2)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^1_{21}=48,69\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^1_{22}=7,12\%$
  - Puerto *hub*: 4.576.720 habitantes:  $X^1_{23}=39,57\%$
  - La Serena: 296.253 habitantes:  $X^1_{24}=2,56\%$
  - Rancagua: 236.363 habitantes:  $X^1_{25}=2,04\%$
- **MOS sur:**
  - Sentido Centro-Sur:

#### ETAPA I:

Población ficticia para puerto *hub* que envía al sur (PPC1)=población por cabotaje norte-sur (PCNS1)+población por importación desde el norte (PEDN1):

- PCNS1 (población por cabotaje norte-sur): Se asumirá ésta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta sureños (considerados para el MOs sur): 1.352.823 habitantes
- PEDN1: población por importación que llega desde el norte. Considerando los datos facilitados por Directemar (tonelaje por importación por puerto y tipo de bien para el 2012), así los puertos del sur (ver Tabla 23 y Tabla 24) importan 948.587t anuales de mercancía contenedorizable.

#### ETAPA II:

Población ficticia para puerto *hub* que envía al sur (PPC1)=población por cabotaje norte-sur (PCNS1)+población por importación desde el norte (PEDN1):

- PCNS1 (población por cabotaje norte-sur): Se asumirá ésta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta sureños (considerados para el MOs sur): 1.116.460 habitantes
- PEDN1: población por importación que llega desde el norte. Considerando los datos facilitados por Directemar (tonelaje por importación por puerto y tipo de bien para el 2012), así los puertos del sur (ver Tabla 23 y Tabla 24) importan 925.369t anuales de mercancía contenedorizable.

- Sentido Sur-Norte:

#### ETAPA I:

Población puerto central que envía al norte (PPC2)=población por cabotaje sur-norte (PCNS2)+población por exportación hacia el norte (PEDN2):

- PCNS2 (población por cabotaje sur-norte): Se asumirá ésta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta norteños: 796.094 habitantes
- PEDN2: población por exportación hacia el norte. De acuerdo a Directemar (tonelaje por exportación por puerto y tipo de bien para el 2012, ver Tabla 23 y Tabla 24) exportan 8.771.652t anuales de mercancía contenedorizable.

#### ETAPA II:

Población puerto central que envía al norte (PPC2)=población por cabotaje sur-norte (PCNS2)+población por exportación hacia el norte (PEDN2):

- PCNS2 (población por cabotaje sur-norte): Se asumirá ésta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta norteños: 499,841 habitantes
- PEDN2: población por exportación hacia el norte. De acuerdo a Directemar (tonelaje por exportación por puerto y tipo de bien para el 2012, ver ver Tabla 23 y Tabla 24) exportan 8.771.337t anuales de mercancía contenedorizable.

Tal y como se procedió para la MOs norte, para los cálculos se ha tenido en cuenta los valores de toneladas de tráfico exterior y cabotaje recogidos en las Tabla 23 y Tabla 24. De nuevo, se ha asumiendo equilibrio entre ambos sentidos para el tráfico de cabotaje entre las zonas sur y centro-norte, esto es 569.439 toneladas anuales (1.138.879/2).

Así, para la Etapa I:

El tonelaje anual contenedorizable asumido en dirección norte-sur por cabotaje es de 127.769 toneladas anuales, son enviadas a una población máxima (población del centro y la población del sur): 7.808.668 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de exportación del norte de 3.334.399 t será de 203.782.708 habitantes.

Etapa II:

El mismo tonelaje anual contenedorizable en este caso, son enviados a una población máxima (población del centro y la población del sur): 8.104.921 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de exportación del norte de 3.334.399 t será de 211.514.019 habitantes.

Etapa I:

Por otro lado para la dirección sur-norte, el tonelaje anual contenedorizable movido por el centro y el sur en dirección sur-norte es enviado a una población máxima (población del norte): 796.094 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de importación del norte de 1.042.133 t será de 6.493.222 habitantes.

Etapa II:

Para la dirección sur-norte, el tonelaje anual contenedorizable movido en dirección sur-norte es enviado a una población máxima (población del norte): 499.841 habitantes, la población equivalente que generaría un movimiento de importación del norte de 1.042.133 t será de 4.076.879 habitantes.

Etapa I:

El tonelaje anual contenedorizable movido hacia el sur en dirección norte-sur es enviado para una población máxima (población del sur): 1.352.823 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de importación hacia el sur de 948.587t será de 2.253.567 habitantes.

Etapa II:

El tonelaje anual contenedorizable movido por el sur en dirección norte-sur es enviado a una población máxima (población del sur): 1.116.460 habitantes, la población equivalente previsible que generaría un movimiento de importación hacia el sur de 925.369 t será de 10.547.654 habitantes.

Etapa I:

Por otro lado para la dirección sur-norte, el tonelaje anual contenedorizable enviado hacia el centro y el sur en dirección sur-norte es enviado a una población máxima de (población del norte y del centro): 7.251.939 habitantes, la población equivalente que atraería un movimiento de exportación del sur de 8.771.652 t sería de 111.708.944 habitantes.

Etapa II:

Para la dirección sur-norte, el tonelaje anual contenedorizable enviado hacia el centro y el norte en dirección sur-norte es enviado a una población máxima (población del norte y del centro): 7.488.302 habitantes, la población equivalente que generaría un movimiento de exportación del sur de 8.771.337t sería de 670.574.330 habitantes.

Así la población equivalente en el puerto de carga será:

ETAPA I:

- Dirección Norte-Sur (PCNS1+PEDN1): 1.352.823 habitantes habitantes+2.253.567 habitantes=**3.606.390 habitantes**
- Dirección Sur-Norte (PCNS2+PEDN2): 796.094 habitantes habitantes+111.708.944 habitantes **112.505.038 habitantes**

Por tanto, las probabilidades de reparto de la carga en los nodos centrales serán:

- Norte-Sur (j=1)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^2_{11}=55,97\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^2_{12}=8,19\%$
  - Puerto *hub*: 3.606.390 habitantes:  $X^2_{13}=35,84\%$
- Sur-Norte (j=2)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^2_{21}=4,73\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^2_{22}=0,69\%$
  - Puerto *hub*: 112.505.038 habitantes:  $X^2_{23}=94,60\%$

ETAPA II:

- Dirección Norte-Sur (PCNS1+PEDN1): 1.116.460 habitantes +10.547.654 habitantes=**11.664.114 habitantes**
- Dirección Sur-Norte (PCNS2+PEDN2): 499,841 habitantes habitantes+670.574.330 habitantes=**671.074.171 habitantes**

Por tanto, las probabilidades de reparto de la carga en los nodos centrales serán:

- Norte-Sur (j=1)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^2_{11}=30,19\%$
  - Valparaiso: 824.006 habitantes:  $X^2_{12}=4,42\%$
  - Puerto *hub*: 11.664.114 habitantes:  $X^2_{13}=62,53\%$
  - La Serena: 296.253 habitantes:  $X^2_{14}=1,59\%$
  - Rancagua: 236.363 habitantes:  $X^2_{15}=1,27\%$

- Sur-Norte (j=2)
  - Santiago: 5.631.839 habitantes:  $X^2_{21}=0,83\%$
  - Valparaíso: 824.006 habitantes:  $X^2_{22}=0,12\%$
  - Puerto *hub*: 671.074.171 habitantes:  $X^2_{23}=98,96\%$
  - La Serena: 296.253 habitantes:  $X^2_{24}=0,04\%$
  - Rancagua: 236.363 habitantes:  $X^2_{25}=0,03\%$

#### 4.5.3 Costes unitarios del transporte por carretera y coste del MDO

La definición del coste unitario de transporte por carretera  $CK_p$  (€/km), es un dato inicial que está en función del tipo de unidad de carga (TEU-12,5t y FEU-20,5t).

Para ambas unidades de carga se asume un solo tipo de camión capaz de transportarlas, tanto en transporte unimodal como multimodal, y este es un trailer de carga general, con 40 t de máxima carga (26,5 t de máxima carga neta) por tanto suficiente para el transporte de un TEU o un FEU. Se trata de un vehículo de 420 CV articulado con 6 ejes (Heavy Duty Vehicle HDV > 12 t, Directive 2007/46/CE of the European Parliament).

De acuerdo al informe de la Subsecretaría de Transporte Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile ('Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana') en el 2011 a un camión con semiremolque le costaba el transporte de una tonelada: 18,8 \$/t-Km, esto supone:  $CK_1:0,31€/Km$  y  $CK_2:0,50€/km$ .

Según el banco mundial (<http://datos.bancomundial.org/indicador/EP.PMP.DESL.CD>) los precios del diesel para el usuario en Chile, bajaron un 12% en los últimos 4 años, por tanto esa bajada podría reflejarse en la actualización a valores del 2015 del coste del transporte de mercancía por carretera, así:  $CK_1:0,27€/Km$  y  $CK_2:0,44€/km$ .

Los costes del Marine Diesel Oil para la operación del buque se han tomado los relativos a diciembre del 2015, datos del puerto de Singapur.

(<http://www.bunkerworld.com/prices/>) Datos de Singapur 363 dólares/t = 330,22€/t = 0,28€/l

Para costes de escala se han empleado unos genéricos para la totalidad de los puertos evaluados, de manera que todos en el planteamiento actual compiten en igual de condiciones en términos de costes de escala. Una vez filtrados los puertos evaluados, los datos se actualizarán con la información relativa a cada puerto.

En movimiento de contenedores, son convencionales las grúas Portainer, Feeder, Panamax y Post Panamax, con capacidad de 10 filas (32Tn), 13 filas (36 Tn) y 17 filas (40 Tn) de contenedores respectivamente, operan sobre vía de rodadura. Asumiendo una perspectiva conservadora, se tomará como referencia, las grúas Portainer cuya capacidad teórica es de 35 ciclos/h (información facilitada por las 'Especificaciones técnicas de Paceco SA'). Sin embargo, este rendimiento cae con contenedores llenos hasta 24 ciclos/h, por lo que se ha tomado, como primera

consideración, una velocidad de carga descarga de 27 ciclos/h (confirmada por la consignataria 'Pérez Torres S.A.' y la terminal de contenedores 'OPCSA').

Para la operación de las grúas Portainer se asumirán como necesarios 37 metros de eslora de buque para el posicionamiento de una grúa. Por tanto, el número de grúas que operarán en cada buque dependerán de la eslora del buque. Se han asumido por tanto condiciones ideales para todos los puertos (disponibilidad de grúas suficientes) y una rotación media por grúa de 27 ciclos/h.

El resto de costes relativos a la construcción del buque, y su operación y mantenimiento han sido tomados de la publicación de (Martínez-López et al., 2015c).

#### **4.5.4 Costes unitarios para las emisiones contaminantes en Chile.**

Los costes unitarios de los contaminantes:  $CF_{sufv}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$  -€ por kg de contaminante, han sido publicados por países en HEATCO (Bickel et al., 2006) para  $PM_{2.5}/PM_{10}$  y CAFE (Holland et al., 2005) para el resto de emisiones con costes actualizados a valores del año 2010. Los valores de costes recogen aquellos costes relativos al transporte por carretera, ferrocarril transporte aéreo, navegación 'inland' y marítima. El modelo de cálculo tiene en cuenta las diferentes densidades poblacionales para cada tipo de país, las condiciones meteorológicas y los patrones de tráfico (distribución de las emisiones de exhaustación). Todo ellos directamente relacionado con el desarrollo económico del país. A falta de datos específicos sobre Chile y como primera aproximación a esta realidad, se emplearán los datos correspondientes al país publicado con un desarrollo económico más próximo a Chile. El país seleccionado ha sido Portugal.

La similitud en la actividad económica a efectos globales resulta similar en PIB y actividad económica exterior (ver Tabla 26). Si bien la diferencia de extensión entre ambos países es significativa respecto a sus poblaciones, lo que podría hacer pensar que la densidad poblacional también lo es y por tanto sus patrones de tráfico, la situación geográfica de ambos resulta similar con un índice de longitud de costa/superficie cercana a la unidad con clara influencia en el reparto modal del transporte. A tal efecto se han consultados las emisiones de  $CO_2$  por habitante de ambos países (OCDE <http://www.oecd.org/centrodemexico/estadisticas/>) y en el 2011 las emisiones de Chile per cápita alcanzaban 4,4 t por habitante, mientras que en el caso de Portugal el índice era de 4,6t/habitante). Parece, por tanto, que el error asumido en aplicar los costes unitarios de Portugal a Chile no debería ser importante.

**Tabla 26. Comparación Chile/Portugal en el 2014 (elaboración propia)**

2014	Chile	Portugal
PIB (Mill euros)	194.123	173.446
Población (habitantes)	17.772.871	10.394.000
Exportaciones (Mill euros)	57.695	48.172,00
Importaciones (Mill euros)	54.457,70	58.854,00
Extensión (km2)	756.096	92.210
Longitud de costa (km)	6435	943
Longitud de costa/superficie	0,85%	1,02%

Para la actualización de los costes al 2015, se utilizará el IPC (Instituto Nacional de Estadística Luso), que fue el índice utilizado por Jiang et al, (2012) para actualizar estos valores desde los datos publicados en el 2005 (referentes al año 2000) al 2010. Se han asumido los costes de Portugal para Chile y los costes asociados a la navegación en sus aguas ribereñas. Así, finalmente los valores de los costes unitarios asumidos para Chile han sido los mostrados en la Tabla 27.

**Tabla 27. Factores de coste unitarios para contaminantes en el 2015 (€/kg contaminante)**

	NOx	SO <sub>2</sub>	PM <sub>2,5</sub>		
			Metropolitana	Urbana	Exterior a zonas pobladas
Chile	1,807	4,863	352,952	116,153	52,365
Pacífico	2,055	2,826			7,193

En cuanto a la actualización de los costes de CO<sub>2</sub>, simplemente se tomarán por interpolación para el 2015 los datos publicados por Maibatch et al., 2008 que tal y como afirma Jiang et al, 2012, debido al efecto global del daño, sus valores serán independientes de dónde se produzcan (0,0325€/kg CO<sub>2</sub> en 2015).

## 4.6 Simulaciones y resultados preliminares

La optimización llevada a cabo ha tenido en cuenta las tres funciones objetivo: F1 (maximización de la diferencia en términos de costes del transporte unimodal frente al multimodal); F2 (maximización de la diferencia en términos de tiempo del transporte unimodal frente al multimodal); F3 (maximización de la diferencia en términos de costes externos del transporte unimodal frente al multimodal). Las optimizaciones han sido llevadas a cabo con NSGA-II, un algoritmo evolutivo

multiobjetivo. Los parámetros optimizados han sido aquellos identificados como independientes en el modelo matemático:

Velocidad del buque ( $VB$ ) medida en nudos

- Tipo de unidad de carga ( $PP$ ), TEUs para genes positivos y FEUs para valores negativos.
- Capacidad de carga de diseño ( $G_p; \forall p \in PP$ ) medida en unidades
- Edad de los buques desde su construcción en años ( $E_q; \forall q \in Q$ ).
- Sistemas de manejo de la carga ( $MG_g; \forall g \in GG$ ) con grúas propias o de puerto.
- Instalación de Bow thruster ( $MM_b; \forall b \in BB$ ) viable para valores negativos de los genes y positivos en caso contrario.
- Viajes anuales de la flota ( $N_{trips}$ ).

Estos parámetros constituyen los cromosomas de la población de NSGA-II. Durante el proceso de evolución los genes toman valores entre -1 y 1, como es exigido cuando se usa JEAFF (Caamaño et al, 2010), la librería SW de algoritmos evolutivos empleado en este trabajo. Para la evaluación de las distintas soluciones, cada cromosoma es decodificado a sus posibles valores, indicados en la explicación del modelo desarrollado. Además, el algoritmo NSGA-II tiene una serie de parámetros de configuración. Los parámetros utilizados para las pruebas realizadas son los que se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28. Parámetros de configuración para NSGA-II. (elaboración propia)**

Operador	Parametros	Valores
Tournament Selection	Pool Size	2
SBX-Crossover	Probability	5%
Polynomial Mutation	Probability	60%
	N	1

En cada experimento, se han ejecutado 50 pruebas independientes, para comparar cada una de estas pruebas se utiliza la medida de hipervolumen (Zitzler et al., 2000). Esta medida permite comparar distintas ejecuciones de un mismo algoritmo comparando los frentes de Pareto obtenidos utilizando un único valor. De forma que, dados dos frentes de Pareto  $F1$  y  $F2$ ,  $F1$  se considera mejor que  $F2$  si el hipervolumen de  $F1$  es mayor que el hipervolumen de  $F2$ .

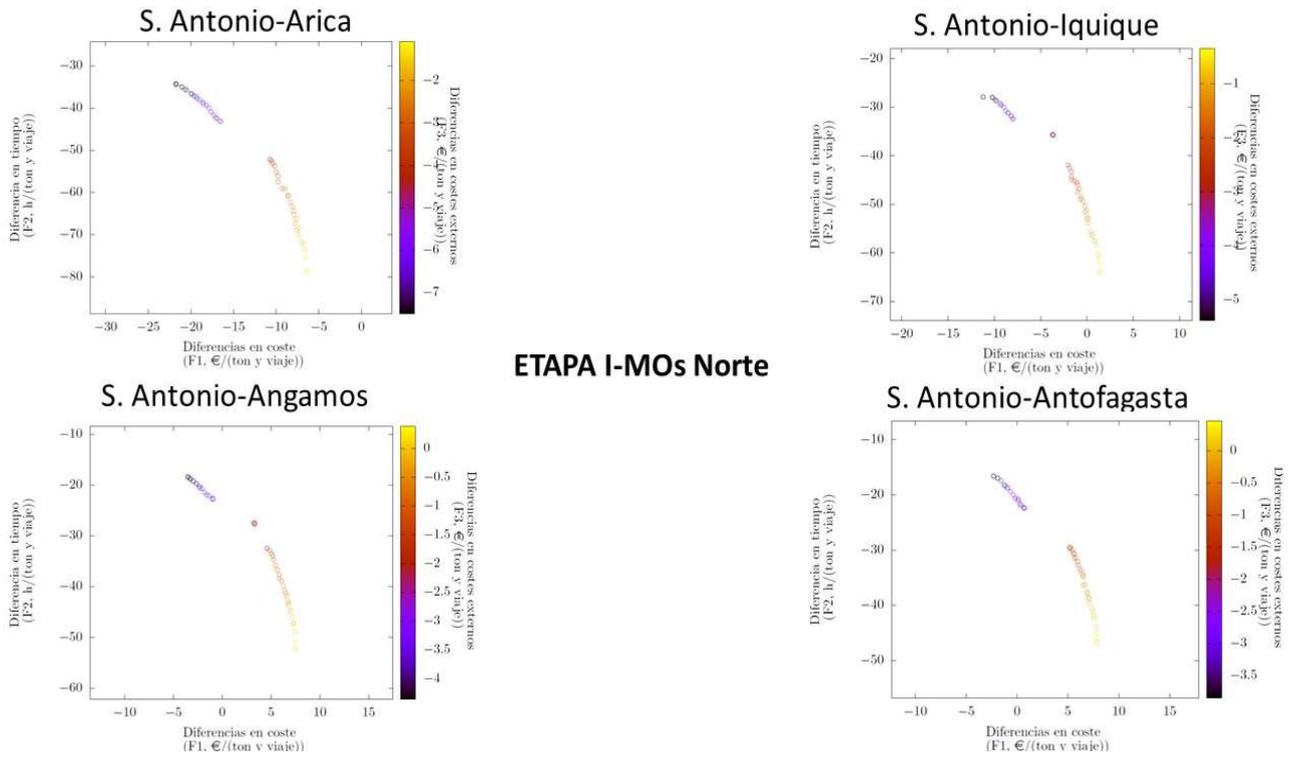
Los algoritmos evolutivos son algoritmos iterativos que ejecutan en cada iteración lo que en computación evolutiva se conoce como generación. Esto es, en cada iteración se genera una población de posibles soluciones utilizando operadores de selección, cruce y mutación. Estas soluciones se evalúan según las funciones objetivo del problema concreto y el proceso continua hasta que se cumple el criterio de parada establecido. En este caso concreto, el criterio de parada utilizado en el algoritmo evolutivo en el número de llamadas a la función de evaluación y depende de la dimensión del problema. El número máximo de llamadas a la función

de evaluación se establece en  $10000 \cdot n$ , siendo  $n$  la dimensión del problema, es decir, el número de variables a optimizar.

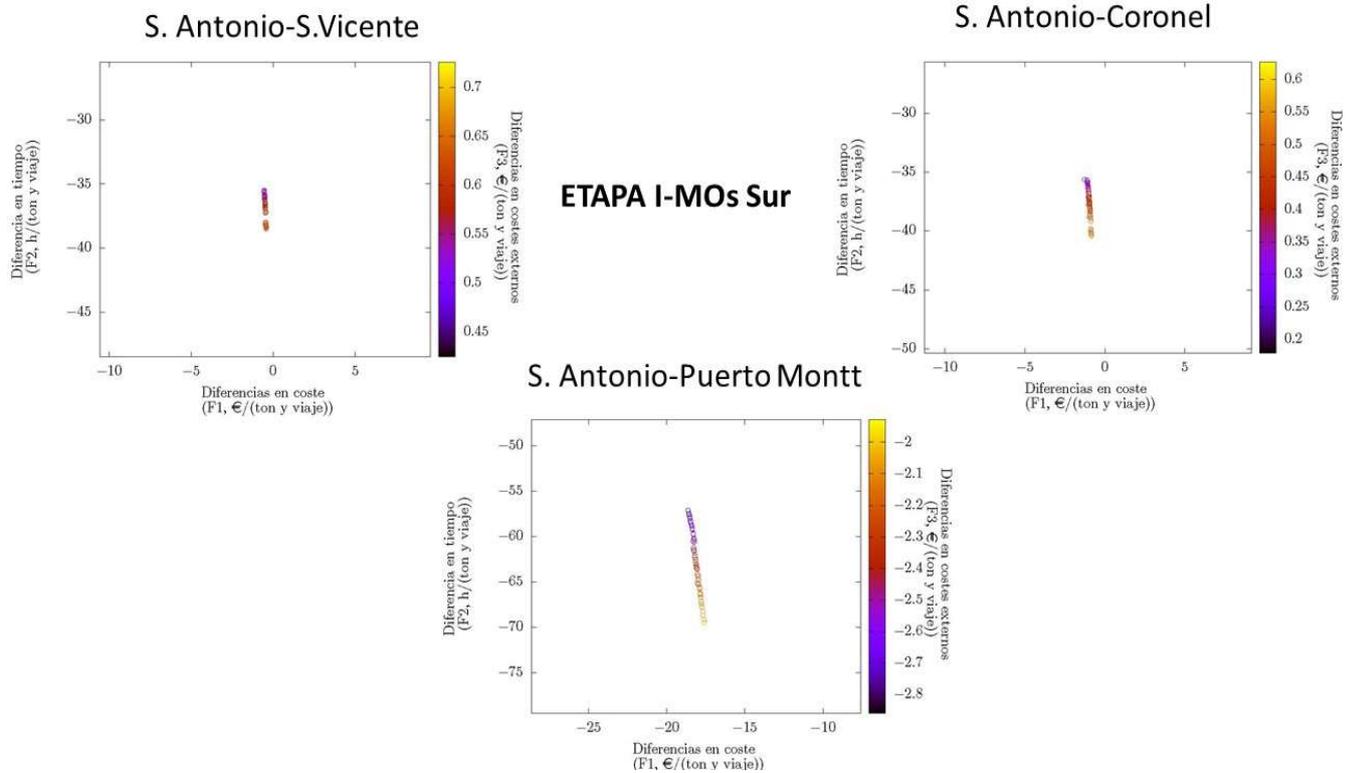
Las soluciones de flotas que articulan rutas multimodales que maximizan la competitividad en términos de tiempo (F2; situadas en el extremo superior izquierdo del frente de Pareto) corresponden a flotas con buques rápidos y pequeños con reducida capacidad de carga que ayuda a minimizar los tiempos de carga/descarga en puerto. Esto implica altas potencias propulsivas y consecuentemente altas emisiones contaminantes. Esto, junto con el hecho de que toman poca ventaja de los efectos de economía de escala (reducida capacidad de carga) lleva a significativos costes externos, motivando la reducción de la ventaja en términos de costes (F1) para el transporte intermodal. Paralelamente las soluciones de flotas que maximizan la ventaja en términos de costes (F1) están situadas en el extremo opuesto del frente de Pareto. Estas flotas, que además resultan ser las más interesantes desde un punto de vista de contaminación medioambiental (F3) están constituidas por buques grandes y más lentos, que articulan rutas intermodales que llegan a ser inaceptables como alternativa a la unimodalidad en términos de tiempo.

En las figuras siguientes (5-8) podemos observar para las etapas 1 y etapa 2 las soluciones obtenidas para las rutas multimodales articuladas a través del posible puerto *hub* San Antonio. En los ejes se observan los valores alcanzados para F1 (€/tonelada y viaje) y F2 (horas/tonelada y viaje) además se muestra los resultados de F3 (€/tonelada y viaje) por emisiones contaminantes en escala de color (cuanto más amarillo es, más medioambientalmente competitiva es la intermodalidad). Obviamente si los valores representan la diferencia, o ventaja entre ambos sistemas de transporte, cuando son negativos, los resultados favorecen a la unimodalidad y en caso contrario a la intermodalidad operada con las flotas optimizadas encontradas.

**Figura 18. Resultados de rutas intermodales con MOs norte (Etapa 1)**



**Figura 19. Resultados de rutas intermodales MOs sur (Etapa 1)**



En la Figura 19 y Figura 20 podemos ver el comportamiento de las rutas intermodales respecto a la alternativa unimodal para las redes asumidas en la etapa I, en términos de tiempos y costes, tanto totales como medioambientales.

Para la MOs norte (ver Figura 18), nos encontramos con valores negativos tanto en tiempo como en costes para cualquier solución de flota a través de la MOs San Antonio-Arica, y en San Antonio-Iquique empiezan a positivizarse los resultados en costes (F1). Para San Antonio-Angamos y San Antonio-Antofagasta, los resultados en costes alcanzan valores positivos, aunque los resultados en costes medioambientales siguen siendo desfavorables a la multimodalidad en la mayoría de las soluciones. En términos absolutos, vistos los valores alcanzables por las rutas intermodales analizadas, parece que Antofagasta sería el puerto más favorable para establecer una autopista del mar norte con San Antonio considerando las redes de la Etapa I. Si bien obtener una ventaja de 7,87€/((tonelada y viaje) acarrearía una penalización máxima en términos de tiempo de unas 46 horas por viaje y una ventaja en costes medioambientales de 0,35€/((tonelada y viaje)). Los resultados tan desfavorables alcanzados en tiempo y en costes en Arica e Iquique, desaconsejarían su estimación para el establecimiento de una autopista del mar con un puerto hub situado en la región central del país para las redes definidas en la etapa I. Estos resultados desfavorables, son principalmente motivados por la situación geográfica de La

Serena. En la etapa I fue considerada como una ciudad norteña, siendo la ciudad más poblada de las tres consideradas para el norte (Iquique, Antofagasta y La Serena) y siendo además, la más poblada (la que representa la probabilidad más alta de atraer o enviar mercancía en el norte  $X_d=X_3=37,21\%$ ) estando situada a 893 km de Antofagasta (El puerto norteño más al sur) y a sólo 491 km de San Antonio.

En cuanto a la MOs sur, Puerto Montt, alcanza resultados especialmente negativos en términos de tiempo. En La Figura 20, se muestran los resultados obtenidos a través de la simulación del comportamiento de la multimodalidad de las rutas articuladas a través de este puerto asumiendo que Puerto Montt contase con grúas portuarias para carga/descarga de contenedores. La penalización en tiempo junto a la penalización encontrada en costes para el transporte multimodal lleva a sugerir la no consideración de puerto Montt como posible nodo de articulación de autopistas del mar en el sur ya que esta resultaría inasumible como alternativa al tráfico puerta a puerta. Las MOs sur San Antonio-San Vicente y San Antonio-Coronel, alcanzaron resultados similares, siendo ligeramente mejores los de San Vicente. La penalización en costes es pequeña, y en costes externos se alcanzan resultados positivos, por tanto, favorables a la intermodalidad. La penalización en tiempo respecto a la unimodalidad, sigue siendo importante, aunque menos que en las MOs norte. En este caso la solución más competitiva en costes externos a través de la MOs San Antonio-San Vicente ofrecería un ahorro de 0,62 €/ (tonelada y viaje) en costes medioambientales, que implicaría una penalización en costes totales de 0,42€/ (tonelada y viaje) y en tiempo de 38,46 horas por viaje. Aunque la diferencia de tiempos es importante, la falta de competitividad del transporte intermodal en términos de tiempo está motivado, una vez más, por la localización de Rancagua; a 141 km de San Antonio y a 419 de San Vicente. En la Tabla 29 se muestran las soluciones del frente de Pareto que maximizan la competitividad en costes (F1)

Las flotas obtenidas para la MOs norte corresponden a buques *feeder* pequeños y la MOs sur a buques *feeder* medianos (ver Tabla 29), esto se corresponde con las necesidades de movimiento de carga más exigentes en el sur (ver Tabla 24). Para Arica, Iquique, Angamos y Antofagasta las flotas obtenidas son buques entre  $620 \leq TEUs \leq 1060$ ,  $15 \leq VB \leq 25$  nudos y  $117 \leq L \leq 140$  metros; Para San Vicente las flotas obtenidas son buques entre  $1321 \leq TEUs \leq 1410$ ,  $15 \leq VB \leq 16,70$  nudos y  $157,5 \leq L \leq 159,12$  metros; Mientras que para Coronel las flotas obtenidas son buques entre  $1312 \leq TEUs \leq 1410$ ,  $15 \leq VB \leq 19$  nudos y  $157,5 \leq L \leq 159$  metros;

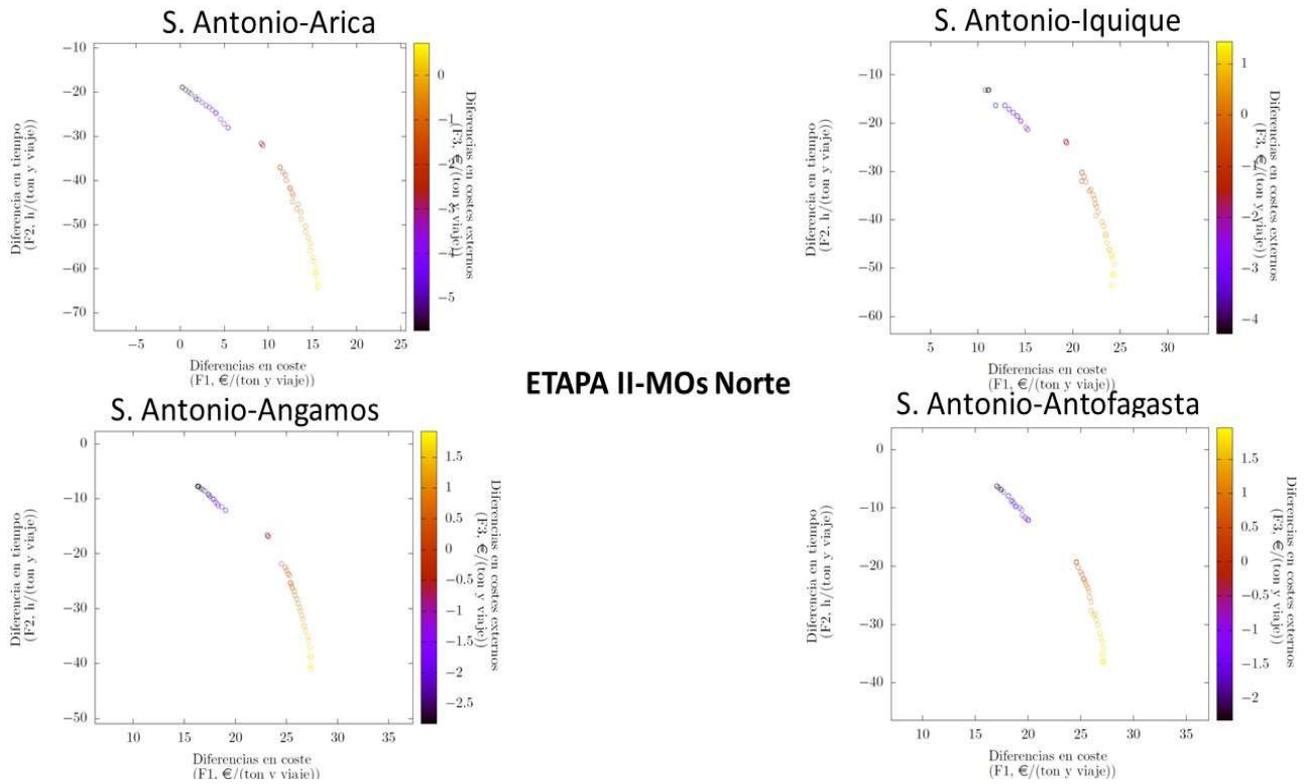
En la Figura 21 y Figura 22 se muestra la competitividad de las rutas intermodales respecto a la alternativa unimodal para las redes estimadas en la etapa II, en términos de tiempos y costes, tanto totales como medioambientales.

**Tabla 29. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MOs en las redes de transporte de Etapa I con San Antonio como *hub***

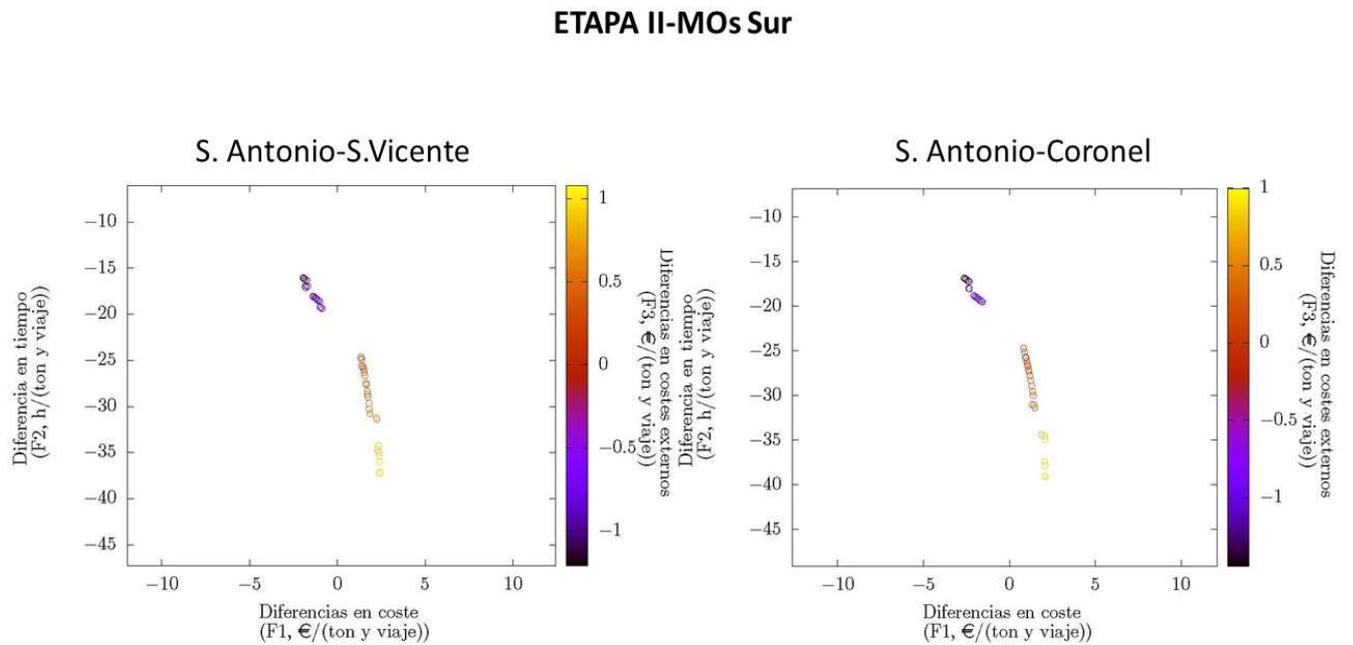
<b>Fleets</b>	<b>Arica</b>	<b>Iquique</b>	<b>Angamos</b>	<b>Antofagasta</b>	<b>San Vicente</b>	<b>Coronel</b>
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	TEUs	TEUs
Capacidad carga ( $G_p$ )	874 TEUs	874 TEUs	874 TEUs	874 TEUs	1.410 TEUs	1.410 TEUs
Velocidad buque (Kn)	15	15	15	15	15	15
Edad de los buques ( $E_q$ )	14 ( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )
Bow thruster	Sí( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )
Sistemas de carga	Grúa Puerto ( $MG_2$ )	Port cranes ( $MG_2$ )				
Número de buques (NB)	7	6	6	5	4	4
Viajes anuales (N)	636	579	630	647	672	672
L (m)	136,02	134,36	137,42	135,79	158,91	158,91
B (m)	23,85	22,58	24,07	23,81	26,01	26,01
D (m)	11,47	11,19	11,58	11,45	12,74	12,73
GT (Ton)	11.133	10.290	11.477	11.098	15.736	15.736
Tipo de propulsor	Hélice Convencional ( $TP_1$ )					
Nº Lineas ejes	1 ( $NSL_1$ )					
Tipo motor propulsor	Diesel ( $TME_1$ )					
Número Motores	1 ( $NME_1$ )					
<b>Resultados de Competitividad</b>						
F1(€/ (txviaje))	6,56	1,25	7,47	7,87	-0,42	-0,85
F2(h/(txviaje))	-75,26	-60,83	-50,85	-45,99	-38,46	-40,37
F3(€/ (txviaje))	-1,32	-0,57	0,25	0,35	0,62	0,53

Los resultados alcanzados para la etapa 2 (ver Figura 20 y Figura 22 y Tabla 30) son significativamente más favorables a la intermodalidad que los alcanzados en la etapa 1 para las rutas articuladas por todas las autopistas del mar.

**Figura 20. Resultados de rutas intermodales con MOs norte (Etapa 2)**



**Figura 21. Resultados de rutas intermodales con MOs sur (Etapa 2)**



Para la MOs norte, nos encontramos de nuevo con valores negativos en la competitividad de las rutas intermodales en términos de tiempo. Si bien se han reducido significativamente desde la etapa 1. Siendo las rutas más favorables en términos de tiempo aquellas articuladas a través de San Antonio-Antofagasta, con diferencias mínimas de 6 horas por tonelada y viaje (ver Tabla 30). En términos de costes totales todas las cadenas intermodales a través de las MOs norte evaluadas resultan más interesantes que la alternativa unimodal, aunque de nuevo, San Antonio-Antofagasta articula las rutas con mayor ventaja, aunque muy próxima a San Antonio-Angamos. Respecto a la ventaja en costes medioambientales (F3), en todas las rutas se encuentran soluciones que alcanzan valores positivos, aunque muy moderados, y existen soluciones de flota con valores negativos. Efectivamente la dependencia de los costes por emisiones respecto a las características de la cadena intermodal a la flota encontrada durante el proceso de optimización es muy alta.

**Tabla 30. Comparación de los rangos de resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MOs para las etapas 1 y 2**

<b>MOs</b>	<b>Funciones Objetivo</b>	<b>Etapas1</b>	<b>Etapas2</b>
San Antonio-Arica	F1(€/t y viaje)	[-22;-6]	[0;16]
	F2(h/t y viaje)	[-79;-34]	[-64;-19]
	F3(€/t y viaje)	[-7;-1]	[-6;0,62]
San Antonio-Iquique	F1(€/t y viaje)	[-11;1]	[11;24]
	F2(h/t y viaje)	[-64;-28]	[-53;-17]
	F3(€/t y viaje)	[-5;-0.4]	[-4;2]
San Antonio-Angamos	F1(€/t y viaje)	[-3.5;7.5]	[16;27]
	F2(h/t y viaje)	[-52;-18]	[-41;-7]
	F3(€/t y viaje)	[-4;0.3]	[-3;2]
San Antonio-Antofagasta	F1(€/t y viaje)	[-2;8]	[17;27]
	F2(h/t y viaje)	[-50;-17]	[-36;-6]
	F3(€/t y viaje)	[-4;0]	[-2;2]
San Antonio-San Vicente	F1(€/t y viaje)	[-0.55;-0.42]	[-1.9;2.4]
	F2(h/t y viaje)	[-38.5;-35.5]	[-36;-16]
	F3(€/t y viaje)	[0.52;0.62]	[-1.1;0.9]
San Antonio-Coronel	F1(€/t y viaje)	[-1.27;-0.85]	[-2.6;2.1]
	F2(h/t y viaje)	[-40.4;-35.6]	[-34.9;-16.8]
	F3(€/t y viaje)	[0.28;0.53]	[-1.3;0.8]

Las MOs sur San Antonio-San Vicente y San Antonio-Coronel, alcanzaron mejoras muy ligeras respecto a la etapa 1 en costes, mientras que la desventaja en términos de tiempo se redujo significativamente en ambas rutas (ver Tabla 30).

En la Tabla 31 se han recogido algunas soluciones de flota para la etapa II. Para Arica, San Vicente y Coronel se muestran las soluciones que maximizan la competitividad en términos de costes de las cadenas intermodales. Para Iquique, Angamos y Antofagasta las flotas mostradas son aquellas que articulan cadenas intermodales con resultados de competitividad intermedios en tiempo y costes. Para la MOs norte: Arica, Iquique y Antofagasta las flotas obtenidas son buques entre  $620 \leq TEUs \leq 1060$ ,  $15 \leq VB \leq 25$  nudos y  $117 \leq L \leq 140$  metros; Prácticamente idénticas a las obtenidas en la etapa I, lo esperado, considerando que la demanda de mercancía total, resulta idéntica en ambas redes (ver Tabla 23 y Tabla 24). Para San Vicente y Coronel las flotas obtenidas son buques entre  $1180 \leq TEUs \leq 1500$ ,  $15 \leq VB \leq 30$  nudos y  $150 \leq L \leq 160$  metros; La reducción de la demanda esperada respecto a la etapa I, motivó la obtención de flotas de menos buques y más pequeños. Es interesante destacar que los resultados obtenidos para las cadenas intermodales articuladas a través de las MOs norte, se vuelven competitivos en términos de costes medioambientales ( $F3 > 0$ ) a mayor velocidad cuanto menor es la distancia de la ruta marítima, así en San Antonio-Arica, la intermodalidad resulta medioambientalmente más conveniente que la carretera cuando las velocidades de los buques bajan de 17 kn mientras que ocurre lo mismo cuando los buques bajan de 24 kn en San Antonio-Antofagasta. Como consecuencia de la reducción de velocidad la línea debería operar con un buque más. En cuanto a las MOs sur, las cadenas intermodales dejan de ser competitivas en costes medioambientales, cuando los buques superan los 20 kn.

**Tabla 31. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MOs en las redes de transporte de Etapa II con San Antonio como *hub***

<b>Fleets</b>	<b>Arica</b>	<b>Iquique</b>	<b>Angamos</b>	<b>Antofagasta</b>	<b>San Vicente</b>	<b>Coronel</b>
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs
Capacidad carga ( $G_p$ )	874 TEUs	852 TEUs	761 TEUs	608 TEUs	1.334 TEUs	1.330 TEUs
Velocidad buque ( $K_n$ )	17	20,56	17,26	16,90	16,11	16,58
Edad de los buques ( $E_q$ )	14 ( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )
Bow thruster	Sí( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )
Sistemas de carga	Grúa Puerto ( $MG_2$ )	Port cranes ( $MG_2$ )				
Número de buques (NB)	6	5	5	4	3	3
Viajes anuales (N)	604	653	668	670	672	672
L (m)	134,38	134,96	127,56	118,49	158,2	157,8
B (m)	23,58	23,68	21,45	20,15	27,41	27,34
D (m)	11,34	11,39	10,55	9,85	13,32	13,27
GT (Ton)	10.202	9.631	8.231	6.798	16.612	16.268
Tipo de propulsor	Hélice Convencional ( $TP_1$ )					
Nº Líneas ejes	1 ( $NSL_1$ )					
Tipo motor propulsor	Diesel ( $TME_1$ )					
Número Motores	1 ( $NME_1$ )					
<b>Resultados de Competitividad</b>						
F1(€/( $t \times$ viaje))	14,20	20,92	25,80	25,41	1,85	1,50
F2(h/( $t \times$ viaje))	-50,35	-32,02	-27,58	-22,73	-30,75	-31,36
F3(€/( $t \times$ viaje))	-0,17	-0,41	1,02	1,04	0,46	0,37

#### **4.6.1 Análisis y conclusiones de las simulaciones preliminares**

El análisis llevado a cabo a través de las simulaciones en el escenario 'preliminar' pretendió primeramente, evaluar qué puertos en el norte y sur del país cuentan con una localización más interesante para establecer autopistas del mar con un puerto *hub*, situado en la región central, de manera que las rutas intermodales articuladas a través de ellos ofrezcan servicios de transporte competitivos frente a la alternativa por carretera (la unimodal). Paralelamente se ha optimizado la flota y su servicio que maximizarían las oportunidades de éxito de la intermodalidad frente a la unimodalidad.

En este primer análisis se han asumido dos cadenas intermodales con extremos de ruta diferentes aunque siempre basadas en criterios poblacionales: etapa I, con tres extremos de ruta en el norte, tres en el centro y tres en el sur del país; y la etapa II, con dos extremos en el norte, cinco en el centro y dos en el sur. Los extremos han sido definidos como aquellos centros más poblados en cada región. El modelo matemático ha asumido igualdad en los costes de escala para todos los puertos y una situación operativa ideal en puerto para los buques: ruta directa en puerto para los contenedores y buques exentos de práctico y remolcador si cuentan con instalación de *bow thruster* (plantamiento clásico para la promoción de autopistas del mar). Adicionalmente, se ha asumido que el coste de las emisiones medioambientales en Chile (costes unitarios por emisiones contaminantes) y los coeficientes de emisión de los camiones son equiparables a los de Portugal, considerando el nivel de desarrollo del país en PIB y su geografía.

Se han analizado los resultados obtenidos tomando como posible *hub* San Antonio, asumiendo que los resultados para Valparaíso serán similares dada su cercanía geográfica.

Los resultados alcanzados muestran una situación más favorable para la intermodalidad asumiendo la red de transporte definida para la etapa II. En cualquier caso, parece que el puerto norteño con mejores perspectivas de ofrecer rutas multimodales competitivas a la carretera es Antofagasta, donde la ventaja de la intermodalidad en términos de costes es importante: 25,41€/t y viaje, mientras que en términos de tiempo la desventaja podría ser asumida por cierta clase de mercancía (22,73 horas aproximadamente respecto a la carretera que invierte 26,5 horas de media en el trayecto). Sería interesante, por tanto, para esta autopista del mar definir la importancia relativa de tiempo frente a coste para los cargadores y tipo de mercancía afectada. Angamos representa también una alternativa interesante para establecer la MOs norte, sin embargo la desventaja en tiempo respecto a las cadenas articuladas a través de Antofagasta (casi 5 horas) y su mayor número de buques requeridos (5 frente a 4, ver Tabla 31) aconsejarían estudiar como primera opción Antofagasta como puerto periférico en el norte. En cuanto a las rutas del sur, los resultados alcanzados son claramente mejores para las redes de la etapa II. Si bien los resultados de las cadenas a través de San Vicente son similares a los de Coronel, existe una ligera ventaja para rutas articuladas a través de San Vicente en tiempo, costes externos e impacto medioambiental. Las rutas intermodales en el sur son absolutamente no competitivas en términos de tiempo (retrasos frente a la carretera de 31 horas de media cuando el tiempo medio por carretera es de 5,6 horas) y la ventaja en costes no parece suficiente para animar a elegir esta alternativa modal. Tanto para las MOs norte como para las MOs sur la ventaja de las cadenas intermodales en términos de impacto medioambiental son pequeñas, cuando son positivas. En este estudio se han considerado camiones Euro-III y buques consumiendo continuamente MDO, sin ningún elemento de reducción de emisiones (catalizador, etc), lo que obviamente influye negativamente en el impacto medioambiental de la multimodalidad. A pesar de este hecho, la razón fundamental de esta desventaja

medioambiental es una combinación de factores, entre los que cabe destacar el excesivo tiempo en el transporte a través de la intermodalidad.

Para el caso de las cadenas intermodales actuando con la MOs norte San Antonio-Antofagasta, el transporte unimodal se corresponde con 1.597 km de media que implican unos costes medioambientales basados en el transporte de un FEU (ver unidad de carga más conveniente en Tabla 31) de 3,67€/t y viaje) y 26,35 horas de transporte; la alternativa intermodal supone recorrer un tramo marítimo de 1.141 km (42,87 h totales, incluyendo estadías en puerto asumiendo esquema de carga para unidad de referencia 'first in-last out') y 218 km y 51,5 km para los tramos por carretera de las cadenas. Los costes medioambientales del tramo marítimo alcanzan 2,12€/t y viaje ( $VB=21,2kn$ , ver tabla 9) y los acarreo terrestres 0,44€/t y viaje y 0,09€/t y viaje, respectivamente.

Para las cadenas intermodales a través de MOs (sur) San Antonio-San Vicente, el transporte unimodal se corresponde con 507 km de media que implican unos costes medioambientales basados en el transporte de TEUs (ver unidad de carga más conveniente en Tabla 31) de 1,91€/t y viaje) y 5,63 horas de transporte; la alternativa intermodal supone recorrer un tramo marítimo de 404 km (35,36 h totales, de las cuales 10 horas corresponderían a la estancia en cada puerto para operaciones de carga/descarga de 723 FEUs o 1.334 TEUs, ver Tabla 31) y 25,51 km y 68,26 km para los tramos por carretera de las cadenas. Los costes medioambientales del tramo marítimo alcanzan 0,449€/t y viaje ( $VB=16,11kn$ , ver Tabla 31) y los acarreo terrestres 0,156 €/t y viaje y 0,093€/t y viaje.

Las cadenas multimodales generadas, tanto en el norte como en el sur, tienen una distancia muy parecida a las unimodales; sin embargo, las mayores exigencias de carga para el sur llevan a encontrar flotas con buques óptimos más grandes y lentos, con una penalización importante en términos de competitividad en tiempo pero que ofrecen una alternativa de transporte más sostenible desde un punto de vista ambiental. La penalización en tiempo está motivada fundamentalmente por los tiempos de carga y descarga en puerto para distancias de transporte reducidas (sobre 510 km en cadenas multimodales). Es interesante destacar que aunque los buques de las cadenas articuladas en el sur son significativamente más grandes, no tienen la repercusión esperada en los costes unitarios para la carga. Es decir, los esperados efectos de economía de escala no son suficientes (el valor de  $F1$  es positivo pero muy limitado), en caso contrario, su efecto es muy positivo en las cadenas norteñas que operan con flotas de buques pequeños y rápidos (ver valores de  $F1$  en Tabla 31 y Figura 20). La intermodalidad deja de ser competitiva en términos medioambientales cuando la velocidad de los buques supera los 24 nudos en las MOs norte y 20 kn en las MOs sur.

A la vista de los resultados, en las siguientes secciones se efectuará un segundo análisis sobre escenarios actuales, esto es, introduciendo valores reales de costes de escala y tiempos de operación para las rutas de la etapa 2. Tales escenarios se determinarán tanto para Valparaíso como para San Antonio como posibles *hub* en sus rutas con Antofagasta en el norte y con San Vicente y Coronel en el sur.

## 4.7 Datos específicos para los puertos seleccionados

Dados los resultados obtenidos en las secciones previas, conviene simular de nuevo el comportamiento de las rutas intermodales identificadas previamente como más interesantes, pero bajo condiciones operativas reales. Es decir, en el análisis anterior se asumieron condiciones idénticas de operación para todos los puertos estudiados en términos de eficiencia en tiempo y coste, que, aunque conveniente en primera aproximación, parece claramente insuficiente para determinar una competitividad realista de las cadenas analizadas.

Por tanto, con el objetivo de conocer las competitividades relativas alcanzadas por las cadenas intermodales frente a la unimodalidad, en esta sección se definirán las condiciones particulares de los puertos que determinan los escenarios actuales de operación de las cadenas intermodales.

Dos aspectos serán especialmente sensibles en la definición de estos nuevos escenarios: el número y eficiencia de los medios de carga portuarios y sus costes de escala. Con la correcta caracterización de estos aspectos pasaremos del análisis de escenarios previos (o ideales) al estudio de escenarios actuales (o particularizados a las condiciones portuarias actuales).

Los aspectos anteriores, incidirán en la modificación del modelo matemático previamente introducido (ver sección Formulación). Concretamente en el cálculo de los costes asociados al tramo marítimo de la cadena intermodal ( $CMU_3$ ) que integran, entre otros, los costes de escala y de carga del buque en puerto ( $CT_7$ ,  $CT_8$ ,  $CT_9$ ,  $CT_{10}$ ,  $CT_{11}$  y  $CT_{12}$ )

$$CMU_3 = RE_3 + \left( \frac{1}{G_p \times P_p \times Ntrips} \right) \times \sum_{c=1}^{12} CT_c \quad \forall p \in PP \quad (6)$$

Así en el modelo original que simuló los escenarios previos, se definieron los siguientes costes para todos los puertos estudiados según la estructura tarifaria de un puerto europeo que es nodo de autopistas del mar activas:

$CT_7$  : tasa por uso del muelle al buque

$CT_8$  : tasa por uso de muelle a la mercancía

$CT_9$ : costes de practicaje

$CT_{10}$ : costes de remolque

$CT_{11}$ : costes de amarre

$CT_{12}$ : costes de carga y descarga (transferencia de la carga)

La adaptación a la estructura de costes a los puertos chilenos se ha llevado a cabo considerando las tarifas y manuales de servicios publicados por las principales terminales marítimas de dichos puertos ( $CT_7$ ,  $CT_8$ ,  $CT_{11}$  y  $CT_{12}$ ). En concreto se han considerado:

- Valparaíso: Terminal Pacífico Sur Valparaíso (Manual de los servicios de TPS, 2016 y Anexo de tarifas, 2016);

- San Antonio: San Antonio terminal internacional (Manual de los servicios de STI, 2013 y Anexo N°1 de tarifas vigentes a 2016);
- Antofagasta: Antofagasta Terminal Internacional S.A (Manual de los servicios de ATI, 2013 y Listado de tarifas ATI periodo 2015-2016);
- San Vicente: San Vicente Terminal Internacional S.A. (Manual de los servicios de SVTI, 2013 y tarifas vigentes a 2016: <http://www.svti.cl/tarifas.html>);
- Coronel: Puerto de Coronel (Manual de los servicios de Puerto de Coronel, 2015 y Tarifario publicado a año 2016);

Para la adaptación de la estructura tarifaria correspondiente a los servicios de practicaje ( $CT_9$ ) se ha utilizado lo dispuesto en:

- Reglamento de Practicaje y Pilotaje (cuarta edición, Dirección General del territorio marítimo y de Marina Mercante, 2015). En particular los artículos 20 y 21 sobre maniobras exentas de uso de práctico. Además, se ha tenido en cuenta Reglamento de Tarifas y Derechos de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (2015). Capítulo III, art.301, usándose la tarifa globalizada para este servicio.

Finalmente, para la adaptación de la estructura tarifaria correspondiente a los servicios de remolque ( $CT_{10}$ ) se han utilizado:

- A efectos de obligatoriedad de uso de remolcador y su tipo se han considerado los criterios publicados en las resoluciones de habilitación para las instalaciones portuarias de los puertos preseleccionados: Antofagasta, San Vicente, Coronel, Valparaiso y San Antonio. Dichas órdenes son publicadas por la Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante a través de las Capitanías portuarias correspondientes.
- A efectos de coste tarifario, después de evaluar las tarifas de remolque ofertadas por distintas compañías privadas, se puede concluir que las tarifas ofertadas por hora de servicio son prácticamente idénticas para los puertos: Antofagasta, Valparaiso, San Antonio, San Vicente y Coronel y además las tarifas ofrecidas por las diferentes empresas de remolque (Remolcadores Ultratug y CPT remolcadores, entre otros) son muy próximas entre sí. Por tanto, se tomarán las mismas tarifas de remolque para todos los puertos evaluados. Por otro lado, ante la incertidumbre del tiempo que efectivamente se invertirá en dichas maniobras se tomará el coste por faena (1 remolcador). Para este valor de tarifa, que está en función del registro bruto del buque (*Gross Tonnage*), se ha tenido en cuenta la oferta para este servicio de la empresa SAAM (Sudamericana Agencias Aéreas y Marítimas) en el 2014.

Aunque efectivamente, los requisitos de empleo del servicio de remolque son mostrados en las resoluciones de habilitación para las instalaciones portuarias en función de las características propias del puerto, del buque, del capitán y de las condiciones meteorológicas del momento, todos ellos son con carácter general. Es decir, se enfatiza que la decisión última acerca de la cantidad de remolcadores a usar y el tipo en cada maniobra, será resuelta por la Autoridad Marítima. Para el

caso de este estudio, considerando que las simulaciones buscan la optimización técnica y operativa de los buques, ha sido necesario establecer un marco de decisión sobre el número de remolcadores a utilizar basado únicamente en las características técnicas de los buques: sus GTs (Gross Tonnage), la instalación o no de *bow thrusters* y su eslora.

Por otro lado, el tiempo de atraque ( $TVB_3$ ) que incluye los tiempos de carga y descarga (ver ecuación 36) y el tiempo de maniobra en puerto ( $TVB_2$ , ver ecuación 14 que incluye el tiempo invertido en uso obligatorio de práctico  $TS_1$ , servicios de remolque  $TS_2$  requerido por las autoridades portuarias y el tiempo de amarre  $TS_3$ ), son altamente dependientes de las condiciones portuarias.

Los tiempos medios invertidos por uso de práctico, remolque y amarre se han considerado constantes en todos los puertos por falta de datos particularizados para cada puerto.

Para el cálculo del tiempo de atraque ( $TVB_3$ ) es necesario considerar el número máximo de grúas disponibles en puerto para operar en cada buque ( $NG_m; \forall m \in M$  y  $NG_k; \forall k \in K$ ) y sus velocidades medias de operación ( $V_m; \forall m \in M$  y  $V_k; \forall k \in K$ ).

$$TVB_3 = G_p \times \left( \frac{1}{V_m \times NG_m} + \frac{1}{V_k \times NG_k} \right) \quad \forall p \in PP \wedge \forall m \in M \wedge \forall k \in K \quad (36)$$

El número máximo de grúas disponibles para cada puerto serán las grúas que puedan operar a la vez considerando las dimensiones del buque siempre y cuando existan en el puerto grúas disponibles para ello. Por tanto, será necesario conocer cuántas y cuáles son las grúas disponibles en cada puerto.

Considerando las dimensiones de los buques obtenidos en el estudio de los escenarios preliminares sería suficiente el uso de grúas STS *feeder* para las MOs norte y STS *feeder* o Panamax para las MOs sur.

Se ha asumido la existencia de las siguientes grúas por puerto:

- San Antonio: 2 STS Panamax y 4 STS Post-Panamax
- Antofagasta: Tres grúas Gottwald
- Valparaíso: 3 STS Post-Panamax y 3 Super Post-Panamax
- San Vicente: 7 grúas móviles, 6 Gottwald y una Liebherr
- Coronel: 2 grúas Gantry y 2 grúas móviles.
- Para las grúas pórtico se ha asumido una velocidad media de 27 ciclos/h y 18 ciclos/h para las grúas móviles.

Así, con la combinación de las tasas e infraestructuras portuarias correspondientes a cada puerto que articula cada autopista del mar se han construido los escenarios actuales.

## **4.8 Simulaciones y resultados para las cadenas intermodales articuladas a través de las autopistas del mar seleccionadas**

Tal y como se ha concluido en la sección "Análisis y conclusiones de las simulaciones preliminares", se ha adoptado como válida la red de transporte

generada en la Etapa II. Por tanto, considerando esa disposición de red y los puertos periféricos seleccionados como más interesantes para establecer autopistas del mar que constituyan las redes troncales de la intermodalidad, se definirán los *escenarios actuales* que se corresponden con las condiciones particulares que actualmente caracterizan a cada uno de los puertos a analizar. En esta sección se simularán tales escenarios en comparación con los *escenarios preliminares*, que recogían situaciones ideales y comunes a todos los puertos, que fueron analizadas en la sección simulaciones y resultados preliminares.

En la Tabla 32 y Tabla 33 se puede observar las tasas<sup>25</sup> empleadas para cada puerto candidato a 'hub' ( $\forall m \in M$ ) y para cada puerto candidato a 'spoke' ( $\forall k \in K$ ) en los dos escenarios diferentes de análisis. Estas tasas permiten el cálculo de los costes de escala (CT<sub>7</sub> a CT<sub>12</sub>) necesarios para el cálculo del coste del tramo troncal (CMU<sub>3</sub>) en la red intermodal (ver ecuación 6 en el apartado "Maximización de la diferencia en términos de costes").

En la Tabla 32 y Tabla 33 se muestran los valores asumidos para las tasas portuarias en el escenario preliminar, es decir, aquel que permitió simular el comportamiento de las rutas intermodales a través de posibles autopistas del mar operando en condiciones idénticas en todos los puertos evaluados y los valores asumidos en el escenario actual. Este último recoge los valores tarifarios actualmente publicados en las terminales de los puertos analizados, según se describió en el apartado anterior.

La adaptación del modelo al escenario actual para los puertos chilenos ha supuesto la modificación del sistema de cálculo de algunas tasas aplicado para el escenario preliminar. Este es el caso, por ejemplo, del cálculo de la tasa por uso de muellaje a la nave; en el escenario preliminar se calculó en función del arqueado del buque (TB<sub>m</sub>;  $\forall m \in M$  y TB<sub>k</sub>;  $\forall k \in K$ ) mientras que en el escenario actual se calculó de acuerdo al criterio publicado en los manuales de servicios de las terminales y su régimen tarifario, esto es, en función de la eslora de los buques (TB\*<sub>m</sub>;  $\forall m \in M$  y TB\*<sub>k</sub>;  $\forall k \in K$ ).

Con carácter general se puede afirmar que el escenario preliminar presentaba tasas por transferencia de la carga y por muellaje del buque menores. En cambio, las tasas de muellaje por la carga son mayores en el escenario preliminar. Por todo lo anterior, resulta complicado a priori prever si el escenario actual será más o menos favorable a la multimodalidad en términos de costes respecto al escenario preliminar.

Es de destacar que en todos los puertos excepto el de Coronel se ha asumido que la tarifa de amarre está incluida en la tarifa de transferencia de la carga.

---

25 Tasas máximas publicadas por las terminales portuarias

**Tabla 32. Comparación de tasas portuarias para los puertos candidatos a 'hub' entre los escenarios preliminar y actual**

<b>Puertos 'hub'</b>						
	<b>Para todo puerto candidato</b>		<b>Valparaiso</b>		<b>San Antonio</b>	
	<b>Escenario Preliminar</b>		<b>Escenario Actual</b>		<b>Escenario Actual</b>	
<b>Número máximo grúas</b>	NMG <sub>m</sub>	Ilimitado	NMG <sub>1</sub>	6	NMG <sub>2</sub>	6
<b>Velocidad media/grúa</b>	VG <sub>m</sub> (ciclos/h)	27	VG <sub>1</sub> (ciclos/h)	27	VG <sub>2</sub> (ciclos/h)	27
<b>Tasa de buque (CT<sub>7</sub>)</b>	TB <sub>m</sub> (€/GT h) <sup>26</sup>	0,0167	TB* <sub>1</sub> (€/m h) <sup>27</sup>	1,536	TB* <sub>2</sub> (€/m h)	1,574
<b>Tasa de carga (CT<sub>8</sub>)</b>	TM <sub>pm</sub> (€/TEU)	32,73	TM <sub>11</sub> (€/TEU)	7,95	TM <sub>21</sub> (€/TEU)	8,3
	TM <sub>pm</sub> (€/FEU)	49,104	TM <sub>21</sub> (€/FEU)	13,04	TM <sub>22</sub> (€/FEU)	13,61
<b>Tarifas por práctico (CT<sub>9</sub>)</b>	TPC1 (€) <sup>28</sup>	231,28	TPC1 (€) <sup>29</sup>	112,68	TPC1 (€)	112,68
	TPC2 (€)	460,6	TPC2 (€)	337,71	TPC2 (€)	337,71
<b>Tarifas por remolque (CT<sub>10</sub>)</b>	TR1(€/remolcador)	420,12	TR1(€/remolcador)	995,35	TR1(€/remolcador)	995,35
	TR2(€/remolcador)	1093,42	TR2 (€/remolcador)	2190,69	TR2 (€/remolcador)	2190,69
<b>Tarifas por amarre (CT<sub>11</sub>)</b>	TA1 (€/amarre) <sup>30</sup>	96,35	TA1 (€/amarre) <sup>31</sup>	0	TA1 (€/amarre)	0
	TA2 (€/amarre)	316,15	TA2(€/amarre)	0	TA2(€/amarre)	0
<b>Tarifas por carga/descarga (CT<sub>12</sub>)</b>	TC <sub>pm</sub> (€/TEU) <sup>32</sup>	24,81	TC <sub>11</sub> (€/TEU)	83,35	TC <sub>11</sub> (€/TEU)	73,05
	TC <sub>pm</sub> (€/FEU)	49,61	TC <sub>21</sub> (€/FEU)	124,98	TC <sub>21</sub> (€/FEU)	109,56

En la Tabla 32 no se observan diferencias tarifarias significativas entre San Antonio y Valparaiso excepto para transferencia de la carga, donde los valores mostrados para Valparaíso son superiores. Esto indica que, previsiblemente los resultados de competitividad intermodal en términos de costes alcanzados por la intermodalidad a través de ambos puertos serán similares. Tampoco se aprecian diferencias relevantes entre la cantidad o eficacia de sus medios de carga/descarga (grúas), por tanto, en principio parece que las flotas halladas para ambas rutas serán muy próximas entre sí.

En la Tabla 33 se pueden ver los valores asumidos para los costes relativos a la escala del buque en los distintos puertos candidatos a puerto 'spoke'. Estos puertos presentan tasas por muellaje de la carga significativamente mayores que los candidatos a puerto 'hub' siendo en Antofagasta donde esta tasa alcanza mayores valores.

26 La tasa del buque para un buque de 100 metros de eslora y 4520 GT=75,5€/h

27 La tasa del buque para un buque de 100 metros de eslora y 4520 GT=153,6€/h

28 Coste practicaaje de 10000 GT 460,6€

29 Coste practicaaje de 10000 GT 337,71,6€

30 Coste amarre de 10000 GT 218,17€

31 Coste amarre incluido en la tasa de transferencia de la carga

32 Para la tarifa por carga/descarga (transferencia de la carga) se han considerado TEUs de 12,5 t y FEUs de 20,5 t

**Tabla 33. Comparación de tasas portuarias para los puertos candidatos a 'spoke' entre los escenarios preliminar y actual**

<b>Puertos 'spoke'</b>								
	<b>Para todo puerto candidato</b>		<b>Antofagasta</b>		<b>San Vicente</b>		<b>Coronel</b>	
	<b>Escenario Preliminar</b>		<b>Escenario Actual</b>		<b>Escenario Actual</b>		<b>Escenario Actual</b>	
<b>Número máximo grúas disponibles</b>	NMG <sub>k</sub>	Ilimitado	NMG <sub>4</sub>	3	NMG <sub>5</sub>	7	NMG <sub>6</sub>	4
<b>Velocidad media/grúa</b>	VG <sub>k</sub> (ciclos/h)	27	VG <sub>4</sub> (ciclos/h)	18	VG <sub>5</sub> (ciclos/h)	18	VG <sub>6</sub> (ciclos/h)	22,5
<b>Tasa de buque (CT<sub>7</sub>)</b>	TB <sub>k</sub> (€/GT h)	0,0167	TB* <sub>4</sub> (€/m h)	1,954	TB* <sub>5</sub> (€/m h)	2,618	TB* <sub>6</sub> (€/m h)	2,772
<b>Tasa de carga (CT<sub>8</sub>)</b>	TM <sub>pk</sub> (€/TEU)	32,73	TM <sub>14</sub> (€/TEU)	63,86	TM <sub>15</sub> (€/TEU)	33,86	TM <sub>16</sub> (€/TEU)	34,08
	TM <sub>pk</sub> (€/FEU)	49,104	TM <sub>24</sub> (€/FEU)	104,72	TM <sub>25</sub> (€/FEU)	55,53	TM <sub>26</sub> (€/FEU)	55,9
<b>Tarifas por práctico (CT<sub>9</sub>)</b>	TPC1 (€)	231,28	TPC1 (€)	112,68	TPC1 (€)	112,68	TPC1 (€)	112,68
	TPC2 (€)	460,6	TPC2 (€)	0	TPC2 (€)	0	TPC2 (€)	0
<b>Tarifas por remolque (CT<sub>10</sub>)</b>	TR1(€/remolcador)	420,12	TR1(€/remolcador)	995,35	TR1(€/remolcador)	995,35	TR1(€/remolcador)	995,35
	TR2(€/remolcador)	1093,42	TR2 (€/remolcador)	2190,69	TR2 (€/remolcador)	2190,69	TR2 (€/remolcador)	2190,69
<b>Tarifas por amarre (CT<sub>11</sub>)</b>	TA1 (€/amarre)	96,35	TA1 (€/amarre)	0	TA1 (€/amarre)	0	TA1 (€/amarre)	390,87
	TA2 (€/amarre)	316,15	TA2 (€/amarre)	0	TA2 (€/amarre)	0	TA2 (€/amarre)	390,87
<b>Tarifas por carga/descarga (CT<sub>12</sub>)</b>	TC <sub>pk</sub> (€/TEU)	24,81	TC <sub>14</sub> (€/TEU)	82,54	TC <sub>15</sub> (€/TEU)	63,63	TC <sub>16</sub> (€/TEU)	72,72
	TC <sub>pk</sub> (€/FEU)	49,61	TC <sub>24</sub> (€/FEU)	128,9	TC <sub>25</sub> (€/FEU)	98,16	TC <sub>26</sub> (€/FEU)	90,90

En términos de competitividad en tiempo, las limitaciones de medios de carga y descarga y su eficiencia en los puertos periféricos sugieren resultados que penalizan la intermodalidad respecto a los resultados obtenidos en el escenario preliminar.

En la Tabla 34 y Figura 22, Figura 23 y Figura 24 se pueden apreciar los rangos de resultados obtenidos para la competitividad de las cadenas intermodales frente a sus alternativas unimodales empleando las soluciones de flota obtenidas mediante el proceso de optimización aplicado a los escenarios actuales. Si comparamos los rangos de competitividad de la intermodalidad operada mediante flotas óptimas en los escenarios actuales en San Antonio frente a los obtenidos en los escenarios previos (ver Tabla 30, etapa II) podemos concluir que sus variaciones en competitividad son más desfavorables en los escenarios actuales. Son relevantes en términos de costes en todas las rutas lo que está de

acuerdo a lo esperado ya que en todos los puertos se han encontrado desviaciones significativas de sus tarifas respecto al escenario preliminar (ver Tabla 33). Sin embargo esta desventaja resulta crítica para las MOs sur donde en el escenario actual no se encuentran soluciones positivas ni en costes ni en tiempos (F1, F2)

**Tabla 34. Comparación de los resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MOs seleccionadas**

<b>MOs</b>	<b>Funciones Objetivo</b>	<b>San Antonio</b>	<b>Valparaiso</b>
Antofagasta	F1(€/t y viaje)	[6.14.;16.1]	[5.9.;15.5]
	F2(h/t y viaje)	[-44;-9.1]	[-38;-8]
	F3(€/t y viaje)	[-2;2]	[-2;2]
San Vicente	F1(€/t y viaje)	[-7.24;-3.1]	[-6.6;-2.0]
	F2(h/t y viaje)	[-37.2;-16.0]	[-37.8;-16]
	F3(€/t y viaje)	[-1.1;1.1]	[-1.2;1.1]
Coronel	F1(€/t y viaje)	[-8;-3.7]	[-7.5;-2,6]
	F2(h/t y viaje)	[-41.7;-18.2]	[-42.6;-18.1]
	F3(€/t y viaje)	[-1.3;0.9]	[-1.5;1,0]

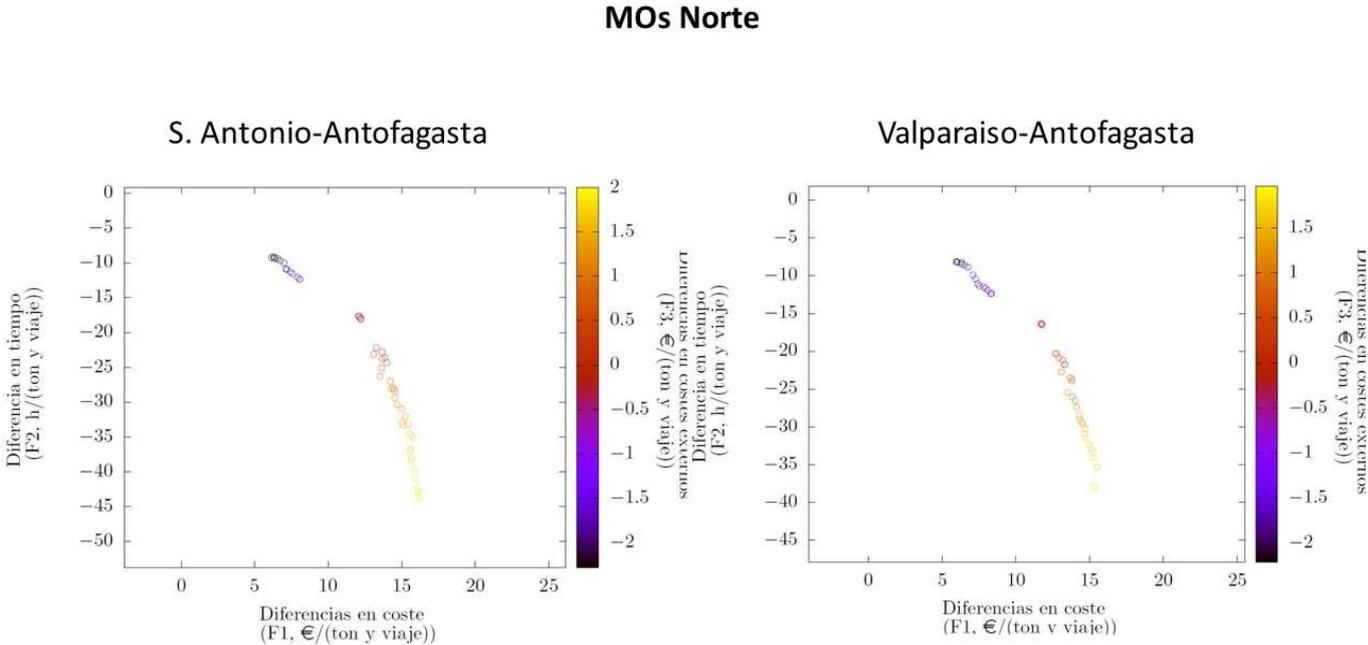
Respecto a las MOs norte esta resulta ser más competitivas desde Valparaíso en términos de tiempo(ver también Tabla 35). Esta ventaja se debe a la coincidencia del puerto con el propio extremo de ruta (La situación del puerto de Valparaíso se ha tomado coincidente con uno de los extremos finales de la carga  $z=2$  y  $z=3$ , ver anexo) y a que la distancia marítima Antofagasta-Valparaiso es menor que Antofagasta-San Antonio. Ambos conceptos no se combinan en las MOs sur donde vemos que el efecto beneficioso de la situación de Valparaiso como nodo extremo de ruta se equilibra por estar más alejado que San Antonio de los puertos sureños. De ahí que las MOs sur no presenten ventaja en tiempo en Valparaiso respecto a San Antonio (ver Tabla 34 y Tabla 35).

En términos de coste resultan rutas intermodales ligeramente más competitivas desde San Antonio para las MOs norte. Contrariamente, las soluciones encontradas a través del puerto de San Antonio son menos competitivas en coste frente a Valparaíso en las MOs sur (F1, ver Tabla 34). Esto es debido a que la diferencia entre sus tarifas por transferencia de la carga, favorable a S.Antonio, no es suficiente para equilibrar el menor coste del transporte unimodal desde una eventual descarga de mercancía exterior en San Antonio hacia la región sur en comparación con el mayor coste que tendría el transporte por carretera si la misma carga se transportase desde una hipotética descarga en Valparaiso (más al norte que San Antonio).

Por otro lado y contrariamente a lo que ocurría en las MOs norte, en términos de tiempo, las MOs sur resultan ligeramente más competitivas a través de S.Antonio

que a través de Valparaíso. Esto es así a pesar de ser más rápida la ruta unimodal a través de S. Antonio (5,64 horas) frente a Valparaíso (6,38 horas).

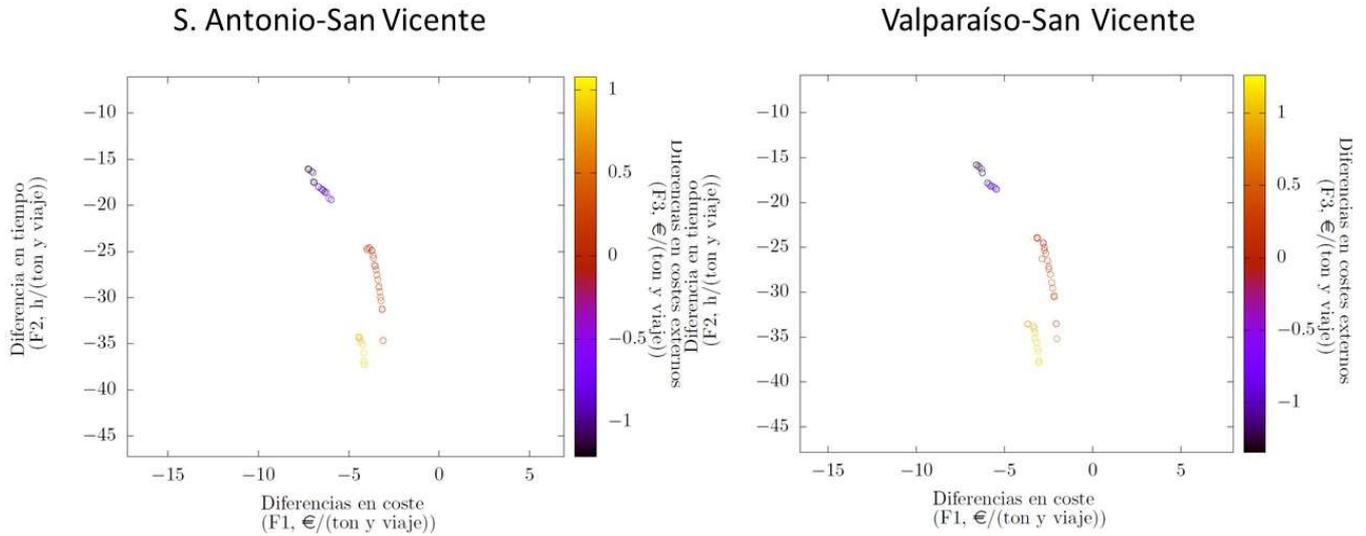
**Figura 22. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MOs norte (Escenario Actual)**



Para las MOs norte: San Antonio-Antofagasta y Valparaíso-Antofagasta las flotas obtenidas son buques entre  $578 \leq TEUs \leq 1000$ ,  $15 \leq VB \leq 30$  nudos y  $117 \leq L \leq 140$  metros. Respecto a la MOs sur a través de San Vicente (San Antonio-San Vicente y Valparaíso-San Vicente) y de Coronel (San Antonio-Coronel y Valparaíso-Coronel) las flotas obtenidas son buques entre  $1199 \leq TEUs \leq 1589$ ,  $15 \leq VB \leq 30$  nudos y  $156 \leq L \leq 161$  metros. Es decir, flotas muy parecidas a las obtenidas en el escenario previo para todas las MOs pero con buques moderadamente más pequeños y rápidos (ver Figura 22).

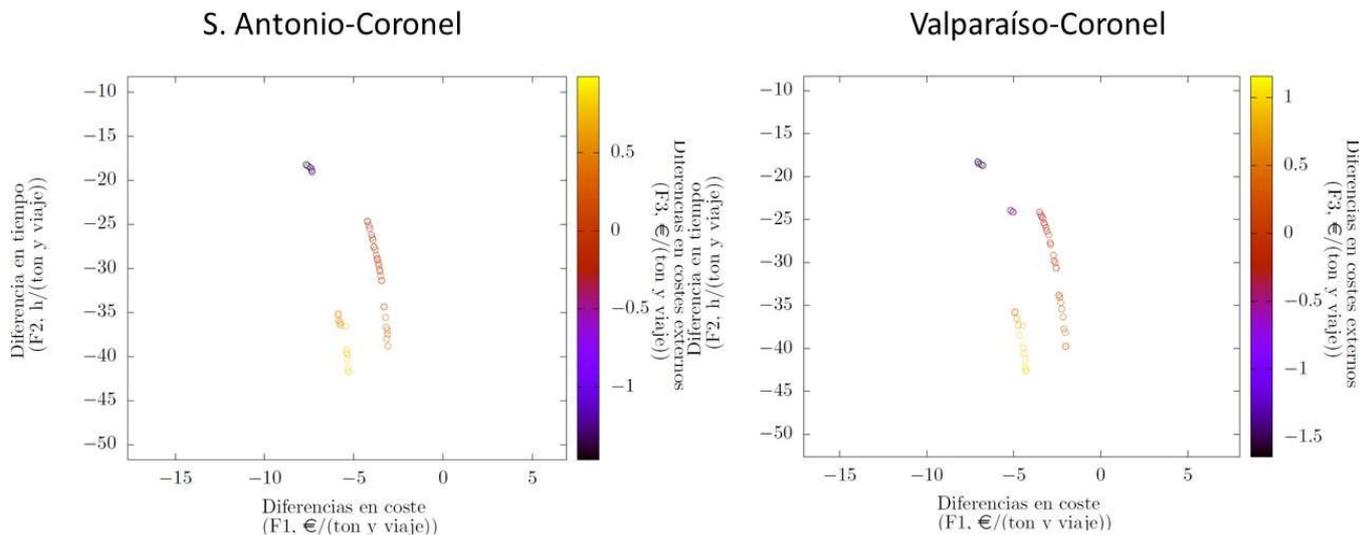
**Figura 23. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MOs sur con San Vicente (Escenario Actual)**

**MOs Sur desde San Vicente**



**Figura 24. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MOs sur con Coronel (Escenario Actual)**

**MOs Sur desde Coronel**



En la Tabla 35 se han recogido algunas propuestas de flota entre las soluciones obtenidas de los frentes de Pareto. En concreto se ha seguido para la selección el mismo criterio que el empleado en el análisis de los escenarios preliminares: Para las redes articuladas a través de Antofagasta hemos adoptado una solución intermedia en términos de competitividad en tiempo y costes. Para aquellas

articuladas a través de San Vicente y Coronel se han mostrado las soluciones que maximizan la competitividad en costes favorable a la intermodalidad.

**Tabla 35. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MOs en las redes de transporte para escenarios actuales**

Puerto periférico (k)	Antofagasta		San Vicente		Coronel	
	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio
Puerto <i>hub</i> (m)	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs
Capacidad carga ( $G_p$ )	579 TEUs	583 TEUs	1.312 TEUs	1.311 TEUs	1.302 TEUs	1.302 TEUs
Velocidad buque ( $K_n$ )	18	18	19,00	19,33	20,8	21,0
Edad de los buques ( $E_a$ )	14 ( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )	14( $E_3$ )
Bow thruster	Sí( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )	Si ( $MM_2$ )
Sistemas de carga	Grúa Puerto ( $MG_2$ )	Port cranes ( $MG_2$ )				
Número de buques (NB)	4	4	3	3	3	3
Viajes anuales (N)	669	671	670	671	672	672
L (m)	118,36	119,23	158,00	158,00	158,00	158,32
B (m)	20,13	20,25	27,36	27,38	27,38	27,43
D (m)	9,84	9,90	13,29	13,31	13,30	13,33
GT (Ton)	6.658	6.746	15.283	15.251	14.809	14.836
Tipo de propulsor	Hélice Convencional ( $TP_1$ )					
Nº Lineas ejes	1 ( $NSL_1$ )					
Tipo motor propulsor	Diesel ( $TME_1$ )					
Número Motores	1 ( $NME_1$ )					
Resultados de Competitividad						
F1(€/ (txviaje))	12,92	13,26	-3,23	-4,24	-3,61	-4,66
F2(h/(txviaje))	-21,00	-22,17	-25,68	-25,41	-26,77	-26,20
F3(€/ (txviaje))	0,87	0,71	0,33	0,26	0,07	0,02

Tal y como se esperaba, las flotas obtenidas para ambos puertos *hub* son muy parecidas entre sí (ver Tabla 35), siendo su diferencia más significativa los resultados de competitividad alcanzados para las cadenas intermodales articuladas a través de ellos (F1,F2 y F3). Lo mismo ocurre en las rutas a través de San Vicente y Coronel debido a la proximidad de ambos puertos periféricos en las MOs sur, donde todas las flotas obtenidas son muy parecidas. Además estas flotas resultan ser similares a las obtenidas en los escenarios previos, si bien son ligeramente más pequeñas y rápidas (ver Tabla 31). Esto puede indicar que las características de los puertos estudiados (Valparaiso, San Antonio, Antofagasta, San Vicente) no presenten una influencia significativa en los resultados de flota óptima respecto a los obtenidos en los escenarios previos (homogéneos, comunes y de recursos

ilimitados en todos los puertos). En otras palabras, las características de las flotas optimizadas para las rutas parecen ser bastante estables, mostrando así cierta independencia a variaciones moderadas en las condiciones de contorno (tarifas, eficiencia de grúas, entre otros).

Aún cuando las flotas obtenidas parecen gozar de cierta independencia a las variables de entorno, los resultados en competitividad alcanzados por las cadenas articuladas sí se ven afectados por estas variables con una influencia significativa. Así en la MOs norte, los resultados de competitividad en el escenario actual respecto a escenarios previos son peores tanto en tiempo como en coste; la diferencia en coste alcanza los 12,15€/t y viaje y la diferencia en tiempo llega a 0,5 horas entre ambos escenarios. El motivo fundamental son las condiciones tarifarias de San Antonio y las condiciones de Antofagasta tanto en grúas como en tarifas respecto a las asumidas en escenarios previos. En las MOs sur, son más ventajosas las rutas desde San Vicente que desde Coronel tanto en tiempo (una hora de diferencia entre ambos) como en coste (0,40 €/t y viaje), tal y como se encontró en el escenario preliminar, si bien el incremento de los costes tarifarios respecto al escenario preliminar ha imposibilitado encontrar alternativas intermodales competitivas en tiempo y coste a la carretera en el escenario actual.

Respecto al comportamiento de las MOs a través de los distintos puertos candidatos a *hub*, debido a sus tarifas más reducidas, San Antonio articula cadenas intermodales más competitivas en coste que las generadas a través de Valparaíso para las MOs norte. Sin embargo esta ventaja (0,36€/t y viaje) no parece suficientemente amplia como para compensar de forma contundente la desventaja en tiempo que ofrecen las rutas intermodales a través de San Antonio respecto a aquellas articuladas a través de Valparaíso con la región norte (una hora). Aunque el valor del tiempo es muy dependiente del tipo de carga, para todas las MOs norte articuladas a través de cualquier candidato a *hub*, los resultados indican retrasos significativos de las cadenas intermodales respecto a la carretera (21 o 22 horas; F2) pero con ahorros relevantes (alrededor de 13€/t y viaje) respecto a la carretera. Lo contrario ocurre con las MOs sur, donde Valparaíso articula rutas más competitivas en coste (1€/t y viaje de diferencia) pero más lentas que desde San Antonio (alrededor de 0,4 horas), aunque en todos los casos alcanzan resultados negativos en competitividad respecto a la carretera.

Consecuentemente, si bien los puertos *spoke* o periféricos para la articulación de las MOs están claros respecto a los resultados alcanzados: Antofagasta en el norte y San Vicente en el sur, los mismos resultados no son contundentes para la elección del puerto *hub*. Por tal motivo se seguirán considerando ambos puertos en el análisis desarrollado en la siguiente sección.

Por tanto las rutas con mejores perspectivas para establecer autopistas del mar en Chile son:

- MOs Norte: Valparaíso/San Antonio-Antofagasta. Con las flotas sugeridas en la Tabla 35, permitiría alcanzar una competitividad significativa frente a las cadenas unimodales en coste y costes medioambientales mientras que

existiría una desventaja en tiempo que habría que considerar de acuerdo a los requisitos de transporte de la mercancía. La flota, para cualquiera de ambos *hubs* estaría compuesta por buques similares a: 'MV Green Fast' (600 TEUs y 17 kn, IMO 9128544); 'Reestborg '94' (558 TEUs, 17,5 kn IMO 9074913) o el *550 TEUs container feeder vessel* a 17,5 kn fabricado por Volharding en 2005 y testado en MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) (<http://volharding.nl/items/pdfs/12385057382009-03-31%20550%20TEU%20Container%20Vessel.pdf>)

- MOs Sur: Valparaiso/San Antonio-San Vicente. De nuevo, considerando la flota optimizada mostrada en la Tabla 35, podemos concluir que las cadenas intermodales resultarían ser ligeramente competitivas en costes medioambientales, pero absolutamente no competitivas en costes totales y tiempos frente al transporte por carretera. Los buques que formarían la flota serían similares, aunque sin grúas a bordo al 'AS Felicia' (1296 TEUs a 19.6 kn, IMO: 9395020) o al 'Fouma' (1300 TEUs a 19 kn, IMO 9395082)

Respecto a la operatividad y capacidad de las autopistas del mar sugeridas operando con las flotas mostradas en la Tabla 35 y en el escenario actual, se garantizaría un servicio diario en cada sentido para ambas autopistas del mar con la siguiente capacidad:

- Valparaiso-Antofagasta: garantizaría un servicio capaz de mover 4.772.646 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 4.632.071 toneladas anuales para la MOs norte ver Tabla 23). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2) en Antofagasta actuarían 3 grúas y 3 en Valparaiso con las características asumidas en la sección anterior (Datos específicos para los puertos seleccionados).
- San Antonio-Antofagasta: garantizaría un servicio capaz de mover 4.883.202 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 4.632.071 toneladas anuales para la MOs norte ver Tabla 23). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2) en Antofagasta actuarían 3 grúas y 3 en San Antonio con las características asumidas en la sección anterior (Datos específicos para los puertos seleccionados).
- Valparaiso-San Vicente: garantizaría un servicio capaz de mover 9.902.935 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 9.892.605 toneladas anuales para la MOs sur ver Tabla 23). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2), sería necesario que San Vicente contase con 6 grúas operativas y Valparaiso con 4.
- San Antonio-San Vicente: garantizaría un servicio capaz de mover 9.917.715 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 9.892.605 toneladas anuales para la MOs sur ver Tabla 23). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2), sería necesario que San Vicente contase con 6 grúas operativas y Valparaiso con 4.

## 4.9 Sensibilización de la optimización de las flotas

Si bien el estudio realizado hasta ahora asumía escenarios estáticos, esto es, valores fijos para las condiciones de contorno, resulta conveniente analizar la influencia de la modificación de los parámetros que definen los escenarios en la optimización de la flota y consecuentemente, en los resultados de competitividad final de la intermodalidad frente a la unimodalidad.

Por tanto, en esta sección se generarán escenarios que recojan la modificación de los principales parámetros de contorno con los siguientes objetivos fundamentales:

- Identificar las variables más influyentes en la competitividad de las rutas multimodales frente a las unimodales. Estas variables podrán ser controlables (como las tarifas portuarias) o no controlables (como el coste del combustible).
- Confirmar la robustez del comportamiento de la intermodalidad mediante la operación de las flotas seleccionadas como óptimas en la evaluación de los escenarios actuales (estáticos) ante escenarios dinámicos (modificaciones con el tiempo de las condiciones de contorno)

El análisis de sensibilidad se llevará a cabo sobre las rutas sugeridas como más interesantes en el estudio de los escenarios preliminares:

- MOs Norte:
  - Valparaíso-Antofagasta
  - San Antonio-Antofagasta
- MOs Sur:
  - Valparaíso-San Vicente
  - Valparaíso-Coronel
  - San Antonio-San Vicente
  - San Antonio-Coronel

### 4.9.1 Selección de variables

Existen tres grupos de variables de interés: aquellas consideradas críticas en la competitividad entre alternativas modales, aquellas que pueden ser modificadas por las autoridades portuarias, capitanías y empresas portuarias, y por tanto, pueden facilitar la toma de decisiones y finalmente aquellas dinámicas, es decir las que varían con el tiempo.

Respecto al primer grupo, las variables más influyentes en la competitividad de las rutas intermodales frente a las rutas unimodales son los atributos relacionados con el transporte por carretera (Martínez-López et al., 2015b): velocidad máxima permitida para el camión ( $VT$ ) y coste unitario del transporte por carretera ( $CK^d_p \forall p \in PPP \wedge \forall d \in DIS$ ).

Las variables que conforman el segundo grupo son las infraestructuras (Número máximo de grúas disponibles por puerto *hub*  $NMG_m; \forall m \in M$  y periférico  $NMG_k; \forall k \in K$ ) y las tasas portuarias sobre cada ruta, esto es: la tasa por uso del muelle al buque ( $CT_7$ ), tasa por uso de muelle a la mercancía ( $CT_8$ ); costes de practicaje ( $CT_9$ ); costes de remolque ( $CT_{10}$ ); costes de carga y descarga (transferencia de la carga)( $CT_{12}$ ). Las tarifas vinculadas al cálculo de estos costes son las publicadas por los puertos correspondientes, por las capitánías portuarias y por las empresas se remolque (ver Tabla 32 y Tabla 33). En la evaluación de las tasas portuarias se valorará el resultado de las modificaciones de las tasas en dos grupos: las tasas por practicaje y remolque y el resto de tasas.

Finalmente, las variables del tercer grupo, aquellas en las que existe la certeza de que cambiarán con el tiempo, esto es, la cantidad de mercancía movida entre regiones (ver Tabla 23 y Tabla 24).

**Tabla 36. Variables seleccionadas para el estudio de sensibilidad**

<b>Velocidad máxima permitida para el camión</b>	VT (Km/h)	<b>Coste unitario del transporte por carretera</b>	$CK^d_p$ (Km/h)	<b>Número máximo grúas</b>	$NMG_m; NMG_k$
<b>Tasa de buque (<math>CT_7</math>)</b>	$TB_m; TB_k$ (€/m h)	<b>Tasa de carga (<math>CT_8</math>)</b>	$TM_{1m}$ $TM_{1k}$ (€/TEU)	<b>Tarifas por práctico (<math>CT_9</math>)</b>	TPC1 (€)
			$TM_{2m}$ $TM_{2k}$ (€/FEU)		TPC2 (€)
<b>Tarifas por remolque (<math>CT_{10}</math>)</b>	TR1(€/remolcador)	<b>Tarifas por carga/descarga (<math>CT_{12}</math>)</b>	$TC_{1m}$ (€/TEU)	<b>Carga mínima movida por sentido (<math>RR_{13}</math>)</b>	$(G_p/2) \times Ntrips$ (contenedores/año)
	TR2 (€/remolcador)		$TC_{2m}$ (€/FEU)		

Para cada ruta estudiada, el valor de cada variable seleccionada (ver Tabla 36) se modificará en un rango de variación de un 20% respecto a su valor base (valor del escenario actual), positivo y negativo con un paso de un 10%. Por tanto para cada ruta y variable se generarán 5 escenarios de estudio (ver Tabla 37) respecto al valor base. El escenario actual que corresponde al 100% del valor base será por tanto el escenario 3.

**Tabla 37. Escenarios de evaluación en el análisis de sensibilidad**

<b>Escenario1</b>	<b>Escenario2</b>	<b>Escenario3</b>	<b>Escenario4</b>	<b>Escenario5</b>
120% Valor base	110% Valor Base	100% Valor base	90% Valor base	80% Valor base

## **4.9.2 Resultados de la sensibilización**

### **4.9.2.1 Evaluación de la influencia de las variables críticas: velocidad máxima de tránsito del camión y coste unitario del transporte por carretera**

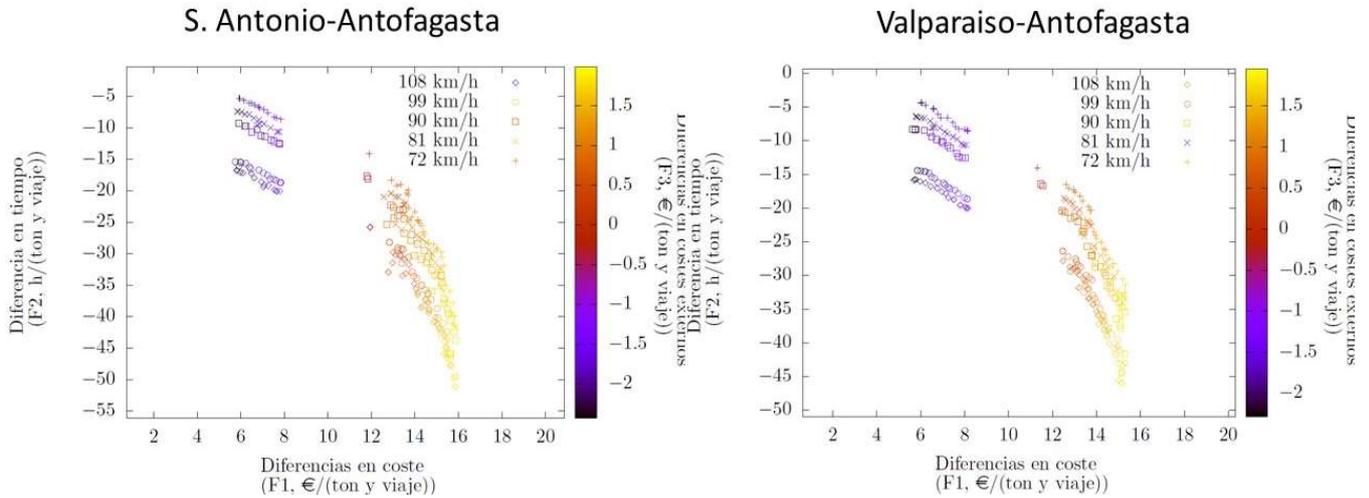
#### **4.9.2.1.1 Velocidad Máxima permitida para el tránsito por carretera**

La velocidad máxima permitida para el tránsito por carretera (VT) se ha tomado como valor base ( $VT=90\text{Km/h}$ ), es decir, el recogido en la normativa de Chile sobre la máxima velocidad del camión (Ley N° 18.290, Art. 145). Este valor fue utilizado para calcular el tiempo invertido por la carretera para llevar mercancía en transporte 'puerta a puerta' (TVU, ver ecuación 8).

En la Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se puede observar la influencia de dicho atributo en los frentes de Pareto obtenidos con las flotas óptimas y los resultados de competitividad alcanzados por las cadenas intermodales operados por ellas frente a la alternativa unimodal. Es interesante destacar que, tanto en la MOs norte como en la sur, la influencia de la velocidad del camión modifica fundamentalmente la competitividad relativa de ambos modos de transporte en términos de tiempo. Sin embargo, mientras que en la MOs norte, se puede observar una clara penalización en la intermodalidad (disminución del valor F2) al incrementar el máximo valor permitido para la velocidad del camión (ver Figura 25), en las MOs sur esta influencia no es en absoluto significativa (ver Figura 27 y Figura 28).

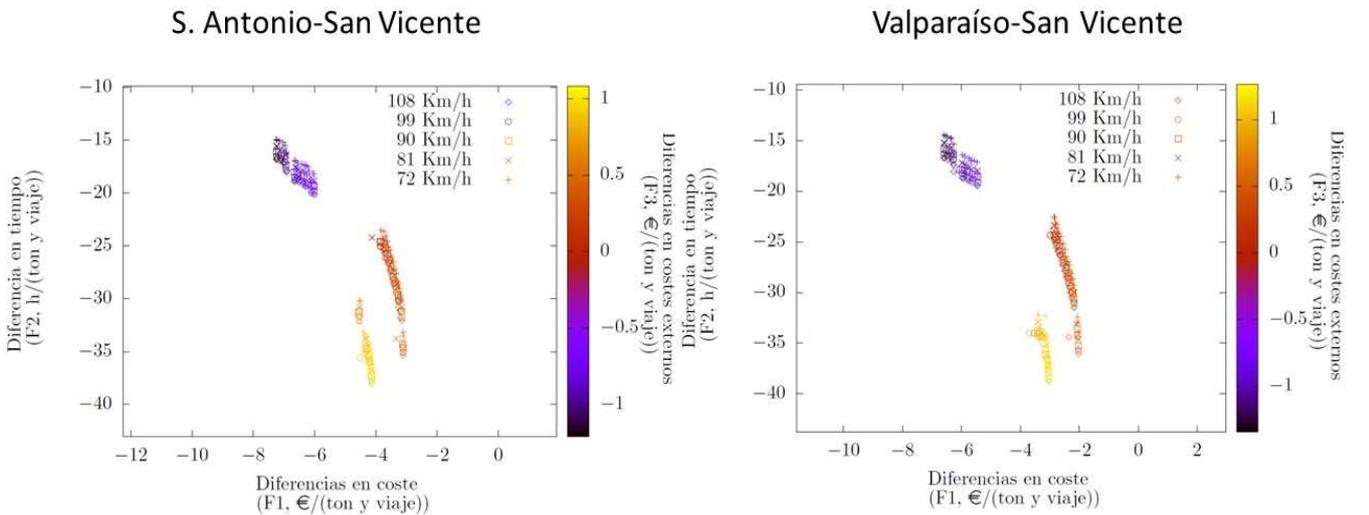
**Figura 25. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a la velocidad máxima del camión por carretera**

**MOs Norte**



**Figura 26. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a la velocidad máxima del camión por carretera**

**MOs Sur desde San Vicente**



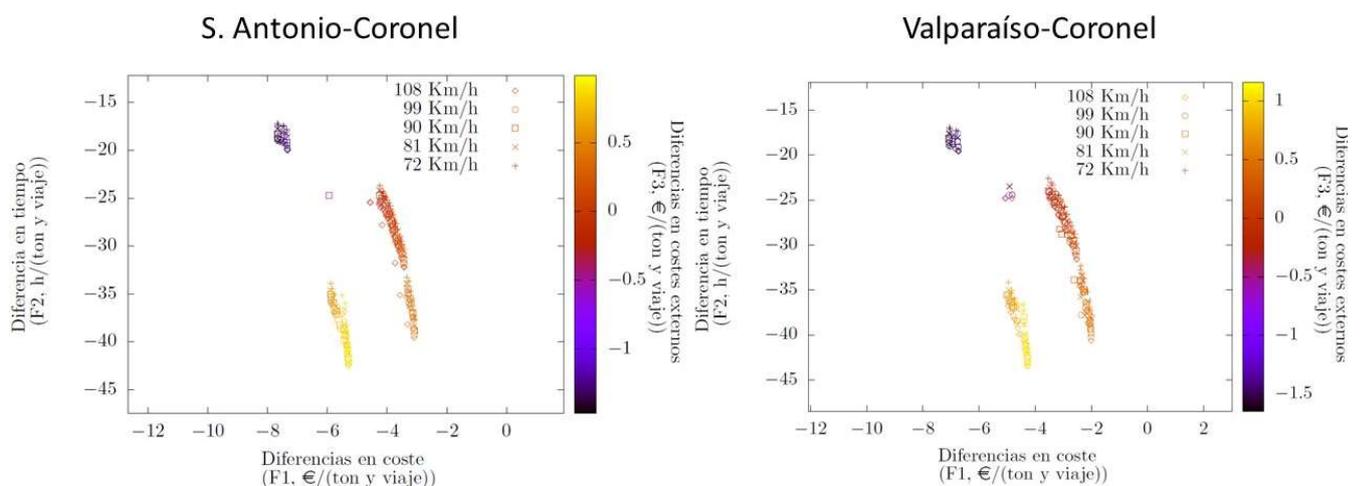
Cuando la distancia total 'puerta a puerta' de la cadena intermodal es significativamente menor que la de la ruta unimodal, la diferente sensibilidad a la velocidad del camión es debida a la configuración de las rutas intermodales, esto es, al peso relativo de sus tramos por tierra y por mar. Así rutas con tramos troncales (marítimos) largos y tramos capilares (terrestres) cortos verán su competitividad en tiempo claramente perjudicada por un incremento en la velocidad de tránsito por carretera. Sin embargo, en rutas con tramos más equilibrados entre mar y tierra, un eventual incremento de la velocidad máxima

permitida para el camión beneficiará a los tramos capilares de la cadena intermodal por lo que esta no se verá tan perjudicada frente a su alternativa unimodal. En otras palabras, será menos sensible a cambios moderados en la velocidad del camión (Martínez-López A. et al., 2015b). Sin embargo, en el caso que nos ocupa los acarreos terrestres en todas las cadenas intermodales representan el 19% de la distancia total. Por tanto, la diferente influencia de la velocidad del camión no es debida a la configuración de las rutas intermodales, sino a su distancia total respecto a la alternativa unimodal.

En el caso de las MOs norte, Por ejemplo, en San Antonio-Antofagasta, se articulan 1411 km intermodales frente a 1597 km por carretera (26,35 horas para la alternativa unimodal), esto supone una reducción de un 13% de la distancia unimodal. La reducción de la distancia en la intermodalidad no es suficiente para ofrecer una alternativa competitiva en tiempo (se han obtenido retrasos respecto a la carretera de entre 44 y 9 horas;  $-44 \text{ h} \leq F2 \leq -9 \text{ h}$ ; ver Tabla 34), pero esta reducción junto con la distancia total de la alternativa unimodal sí es suficiente no sólo para ofrecer una alternativa competitiva en costes (F1 positivos, ver Figura 25) sino también para ver afectada de forma significativa su competitividad en tiempo por modificaciones moderadas de la velocidad del camión (ver Figura 25). Es decir, la falta de competitividad en tiempo de la intermodalidad no es tan grande respecto al tiempo invertido en la unimodalidad como para no verse afectada por cambios moderados en la velocidad del camión. Lo mismo ocurre para las cadenas articuladas a través de Valparaíso-Antofagasta.

**Figura 27. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a la velocidad máxima del camión por carretera**

### MOs Sur desde Coronel



Sin embargo, en las MOs sur la falta de competitividad en términos de tiempo es demasiado grande para verse afectada por cambios moderados en la velocidad del camión. Por ejemplo, San Antonio-San Vicente presenta 498 km de cadena

intermodal frente a 507 km de alternativa unimodal (5.63 horas de transporte para la alternativa unimodal), esto implica un 1,7% reducción en la distancia total de la ruta. Esta escasa reducción de la distancia total junto con el hecho de que la distancia de la ruta unimodal en términos absolutos es demasiado pequeña lleva a retrasos entre 37 y 16 horas de la intermodalidad frente a la unimodalidad ( $37,2h \leq F2 \leq -16h$  para San Antonio-San Vicente, ver Tabla 34). Para encontrar un comportamiento significativamente sensible a la velocidad del camión serían necesarias modificaciones mucho más importantes de este valor.

En la Tabla 38 se muestran para las MOs articuladas con los puertos periféricos sugeridos como más interesantes (Valparaiso-Antofagasta, Valparaiso-San Vicente San Antonio-Antofagasta y San Antonio-San Vicente), los resultados numéricos de competitividad de las rutas intermodales operadas por las flotas óptimas mostradas en la Tabla 35 en los distintos escenarios generados por la eventual modificación de la velocidad máxima permitida para el camión.

**Tabla 38. Sensibilidad a la velocidad del camión de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas**

	<b>Antofagasta</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	12,80	-28,72	0,85
	Escenario2 (110%)	12,70	-27,19	0,87
	Escenario3 (100%)	12,92	-21,00	0,87
	Escenario4 (90%)	12,52	-18,50	0,77
	Escenario5 (85%)	12,61	-16,50	0,77
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	12,99	-29,79	0,68
	Escenario2 (110%)	12,83	-28,18	0,67
	Escenario3 (100%)	13,26	-22,17	0,71
	Escenario4 (90%)	12,89	-20,43	0,69
	Escenario5 (85%)	12,91	-18,31	0,69
	<b>San Vicente</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	-3,25	-26,32	0,32
	Escenario2 (110%)	-3,18	-26,27	0,33
	Escenario3 (100%)	-3,23	-25,70	0,33
	Escenario4 (90%)	-3,2	-25,35	0,33
	Escenario5 (85%)	-3,21	-24,45	0,34
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	-4,28	-26,14	0,26
	Escenario2 (110%)	-4,25	-25,71	0,25
	Escenario3 (100%)	-4,24	-25,41	0,26
	Escenario4 (90%)	-4,24	-24,87	0,26
	Escenario5 (85%)	-4,26	-24,00	0,25

Es interesante prestar atención al comportamiento de las MOs norte ante las modificaciones de la velocidad del camión. El valor de F2 que muestra la competitividad relativa en tiempo para la intermodalidad (eje de ordenadas a la izquierda, ver Figura 25) mejora a intervalos prácticamente constantes y proporcionalmente a la ralentización del camión, excepto al pasar de 99 km/h a 90 km /h (velocidad base), es decir del escenario 2 al 3, donde la diferencia en tiempo entre ambos modos de transporte presenta un salto importante y favorable a la unimodalidad (6 horas). Esta diferencia no se aprecia en las MOs sur.

En la Tabla 38 para San Antonio-Antofagasta actuando con la flota óptima la competitividad relativa en tiempo para la intermodalidad (valores de F2) pasa de un retraso de 28,18 horas en el escenario 2 (F2=-28,18 para Velocidad del camión =110% velocidad camión base) a 22,15 horas en el escenario 3 (F2=-22,17 para Velocidad del camión =100% velocidad de camión base), es decir 6 horas, para

99 km/h y para 90 km/h como velocidad del camión. Para el resto de escenarios (velocidades de camión máximas) las modificaciones son prácticamente constantes siendo estas de aproximadamente 1,8 horas por cada 10% de variación en la velocidad del camión. Variaciones muy similares se han encontrado para la ruta Valparaiso- Antofagasta. Para las MOs sur en la Tabla 36 se puede observar que no existe ese salto diferencial para velocidades de camión entre 90 y 99 km/h (Escenario 3 y escenario 2), mientras que las modificaciones del 10% de la velocidad del camión reperesntan variaciones de 0,5 horas de media en la competitividad relativa entre modos de transporte (F2).

Este comportamiento responde a la estructura de la función que define el tiempo invertido en el transporte por tierra tanto para el transporte unimodal como para los tramos por carretera en las cadenas intermodales (ver ecuaciones 8, 10 y 11). Esta función es escalonada, ya que recoge los descansos mínimos y máximas horas de conducción diarias permitidas en Chile (artículo 25 bis del Código del Trabajo; Dirección de Trabajo del Gobierno de Chile, Noviembre 2015) y por tanto la velocidad crítica que indicará saltos en el tiempo invertido en el tramo unimodal será dependiente de la distancia recorrida. Para el caso del transporte entre las regiones norte y centro la velocidad crítica está situada entre 90 y 99 km/h, por lo que cualquier relajamiento de la norma que permita tránsitos de mercancías por encima de 90 km/h penalizará severamente la competitividad de la cadena intermodal a través de la MOs norte. En la MOs sur, debido a su falta de sensibilidad significativa con este atributo (ver las modificaciones de competitividad con la variación de la velocidad del camión en la Tabla 38) el valor de esta velocidad crítica no es relevante.

Según el análisis anterior se puede concluir que los resultados en competitividad de las rutas intermodales operando con las flotas optimizadas se verán afectados significativamente en las MOs norte en términos de tiempo (ver Tabla 38), especialmente si la velocidad media del camión supera los 90Km/h, mientras que las cadenas articuladas a través de la MOs sur apenas sufrirán modificaciones relevantes en competitividad relativa por la modificación de esta variable dado el retraso que representa la intermodalidad frente a la unimodalidad (alrededor de 25 horas).

#### **4.9.2.1.2 Coste unitario del transporte por carretera**

El coste unitario del transporte por carretera ( $CK^d_p \forall p \in PP \wedge \forall d \in DIS$ ), tal y como se explicó en la sección 'Datos', es un valor dependiente no sólo del tipo de carga y número de camioneros sino también del tipo de vehículo empleado y de la tecnología del mismo. En el presente estudio se asumió un tipo de tecnología para el camión Euro-III (ver sección: 'Flotas, unidades de carga, rutas y puertos') capaz de transportar TEUs y FEUs para tomar un valor base de coste unitario para el transporte por carretera (Heavy Duty Vehicle HDV > 12 t, *Directive 2007/46/CE of the European Parliament*). Sin embargo, efectivamente existirán diferentes tipos de vehículos con sus características particulares que se destinarán al transporte de contenedores en Chile en los próximos años. A mayor abundamiento, los costes

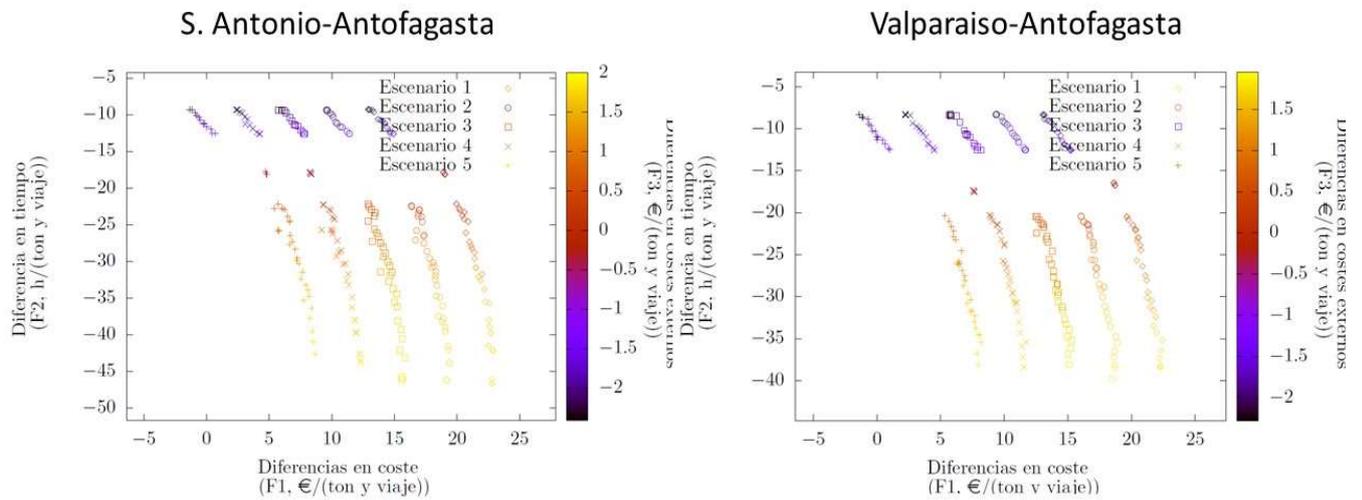
unitarios del transporte por carretera aúnan costes de combustible, mantenimiento, circulación, honorarios, depreciación, gestión y administración y finalmente gastos viáticos. ('Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana', Subsecretaría de Transporte del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile, 2011), siendo los primeros los más relevantes pero también los más volátiles.

Por último cabe mencionar que los costes unitarios base no han tenido en cuenta los costes por uso de infraestructura pública ('Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana' Subsecretaría de Transporte Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile, 2011). En los últimos años la introducción de este parámetro en el coste unitario de transporte de mercancía ha sido objeto de amplias discusiones que han finalizado en la aceptación mayoritaria de que en la construcción y mantenimiento de las redes viales por carretera existe una financiación pública implícita al transporte de mercancías terrestre. Esto no sucede en el transporte marítimo donde el usuario del servicio portuario lo paga. Esta circunstancia causa un desequilibrio en competitividad relativa favorable al transporte unimodal provocada desde las entidades públicas (Baird, 2007; Gesé and Baird, 2013; Trujillo y Medda, 2009; Suárez-Alemán A. et al., 2015). Comportamiento que está siendo corregido en los últimos años por las nuevas políticas de transporte nacionales o supranacionales (Trujillo et al., 2010) que incorporan tarifas de pago a los transportistas por carretera (el Ecobono italiano, Programa Marco Polo de la Unión Europea).

Por todo lo anterior, existe la certeza de que los valores de costes unitarios base para el transporte serán dinámicos en el tiempo debido tanto a ajustes nacionales como a circunstancias internacionales. La evaluación de la sensibilidad a los costes unitarios del camión resulta, por tanto, especialmente pertinente para determinar la estabilidad de las competitividades obtenidas en la intermodalidad. Obviamente este parámetro afectará fundamentalmente a la competitividad en términos de coste (F1).

**Figura 28. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta al coste unitario de transporte por carretera**

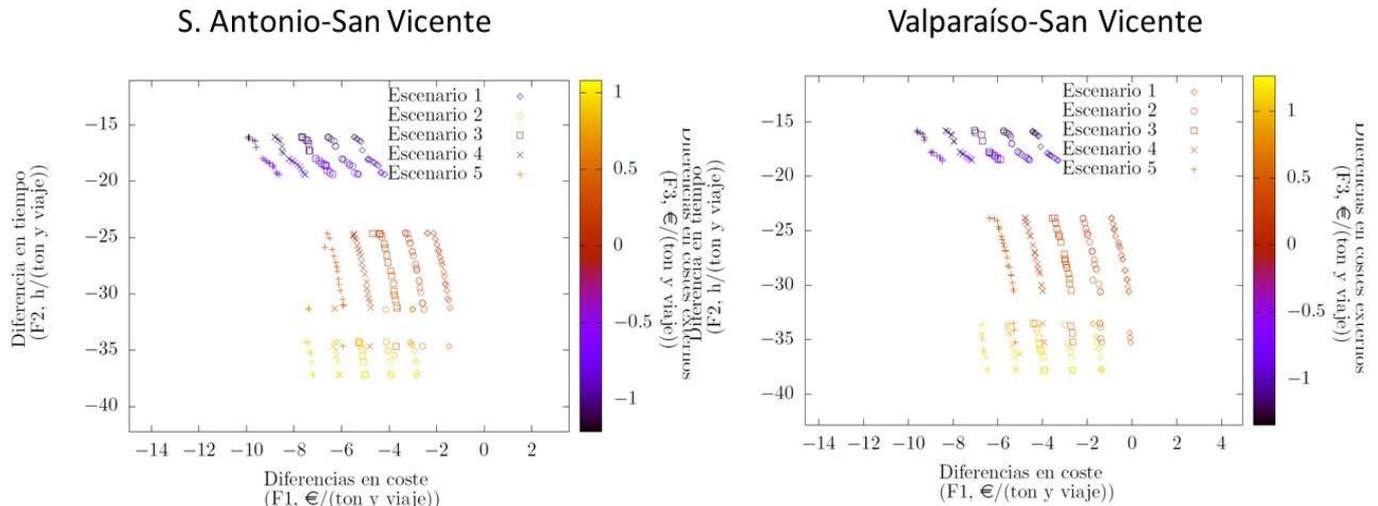
**MOs Norte**



En la Figura 28, Figura 29 y Figura 31 se puede comprobar la relevancia de este parámetro en los resultados de competitividad para todas las MOs evaluadas. En todos los casos los frentes de Pareto se desplazan paralelamente en abscisas con pasos constantes.

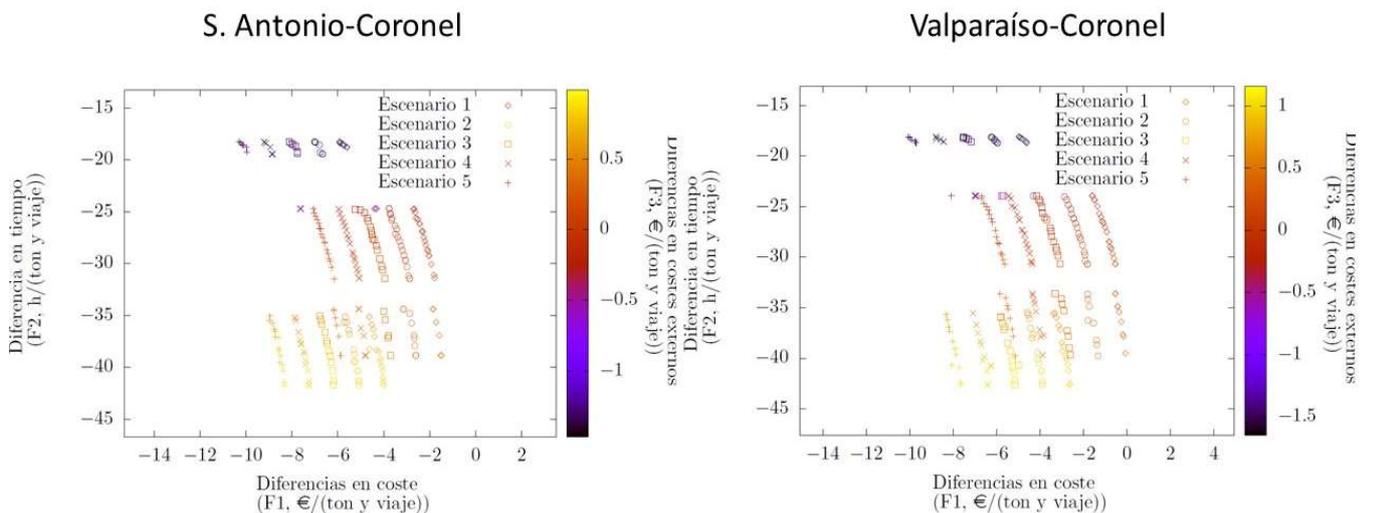
**Figura 29. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente al coste unitario de transporte por carretera**

**MOs Sur desde San Vicente**



**Figura 30. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel al coste unitario de transporte por carretera**

**MOs Sur desde Coronel**



En la Tabla 39 se muestra además la cuantificación de la competitividad de las rutas intermodales articuladas a través de las MOs seleccionadas en la sección anterior con la variación de la variable coste unitario. Efectivamente el incremento de este atributo influye favorablemente a la intermodalidad (crece el valor de F1) en el caso de las MOs norte (Valparaíso-Antofagasta y San Antonio-Antofagasta) el valor de F1 se incrementa una media de 3,6€/t y viaje por cada incremento de 10% en el coste base del transporte por carretera. Respecto a las MOs sur (Valparaíso-San Vicente y San Antonio-San Vicente) el incremento de

competitividad para la intermodalidad es de 1,2€/t y viaje por cada incremento del 10% en el coste base del transporte por carretera. A pesar de la mejora en competitividad en términos de coste para la intermodalidad articulada a través de las MOs sur con el incremento del coste unitario por carretera, no se han encontrado valores positivos para esta función objetivo (F1; ver Figura 29 y Figura 30). Sería necesario un incremento del 130% del valor de coste unitario de la carretera (CU) en el caso de Valparaíso y del 140% en el caso de San Antonio para articular rutas más competitivas en coste que la alternativa unimodal.

**Tabla 39. Sensibilidad al coste unitario del transporte por carretera de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas**

	<b>Antofagasta</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaíso</b>	Escenario1 (120%)	19,75	-20,85	0,82
	Escenario2 (110%)	16,24	-21,07	0,85
	Escenario3 (100%)	12,92	-21,00	0,87
	Escenario4 (90%)	8,97	-20,56	0,80
	Escenario5 (80%)	5,32	-20,38	0,78
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	19,94	-22,12	0,68
	Escenario2 (110%)	16,35	-22,42	0,68
	Escenario3 (100%)	13,26	-22,17	0,71
	Escenario4 (90%)	9,35	-22,22	0,68
	Escenario5 (80%)	5,73	-22,14	0,68
	<b>San Vicente</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaíso</b>	Escenario1 (120%)	-0,66	-25,56	0,32
	Escenario2 (110%)	-1,97	-25,36	0,31
	Escenario3 (100%)	-3,23	-25,70	0,33
	Escenario4 (90%)	-4,52	-25,59	0,32
	Escenario5 (80%)	-5,80	-25,69	0,33
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	-1,93	-26,17	0,29
	Escenario2 (110%)	-3,18	-24,90	0,24
	Escenario3 (100%)	-4,24	-25,41	0,26
	Escenario4 (90%)	-5,32	-25,74	0,27
	Escenario5 (80%)	-6,45	-25,51	0,26

#### **4.9.2.2 Evaluación de la influencia de las variables modificables: autoridades portuarias, capitanías y empresas portuarias.**

Con el fin de tener una visión más detallada sobre la influencia de las tasas portuarias en la competitividad de las rutas intermodales, se han agrupado las

tasas en dos grupos: aquellas que son fijadas por las terminales portuarias y aquellas que no son fijadas por estos organismos. De esta manera se puede precisar la capacidad de influencia que cada ente tiene sobre las posibilidades de éxito en las rutas intermodales compitiendo frente a la alternativa unimodal.

#### **4.9.2.2.1 Las infraestructuras: Número máximo de grúas disponibles por puerto *hub* y periférico**

La importancia de la eficiencia portuaria en la competitividad de las cadenas intermodales fue señalada como vital por autores como Suárez-Alemán A. et al.(2015) quienes sugerían que las políticas de promoción europeas a la intermodalidad a través de SSS quedasen supeditadas a la eficiencia portuaria. Si bien los autores planteaban un punto de vista amplio sobre el concepto eficiencia portuaria: tiempos de espera en puerto, agilidad en trámites administrativos, etc., dadas las características del modelo que nos ocupa y con objeto de concluir si la infraestructura portuaria actual en Chile es teóricamente suficiente para atender las necesidades de operación de las flotas obtenidas actuando en autopistas del mar, se simplificará la evaluación de este atributo a través de un único parámetro: la variación del número de grúas disponibles en el puerto.

El número máximo de grúas disponibles en puerto tiene un doble impacto en la cadena intermodal: impacto en tiempo, tiempo de carga/descarga del buque en puerto ( $TVB_3$ ) e impacto en costes, en concreto en la tasa del buque (servicio de muellaje a la nave,  $CT_7$ ). El número máximo de grúas que pueden trabajar simultáneamente en un buque se ha estimado en función de la eslora del buque y por tanto de su tamaño que es un parámetro optimizable. Consecuentemente será un atributo con influencia considerable en la búsqueda de la flota óptima, sin embargo su influencia dependerá en gran medida del tamaño de la flota encontrada; si los buques son pequeños serán más independientes al número máximo de grúas disponibles en el puerto. Por otro lado, los puertos con mayor tasa de buque (tarifas más altas en el muellaje de la nave, y con menor número máximo de grúas disponibles Antofagasta y Coronel ver Tabla 33) verán más influenciada su competitividad por modificación de este atributo.

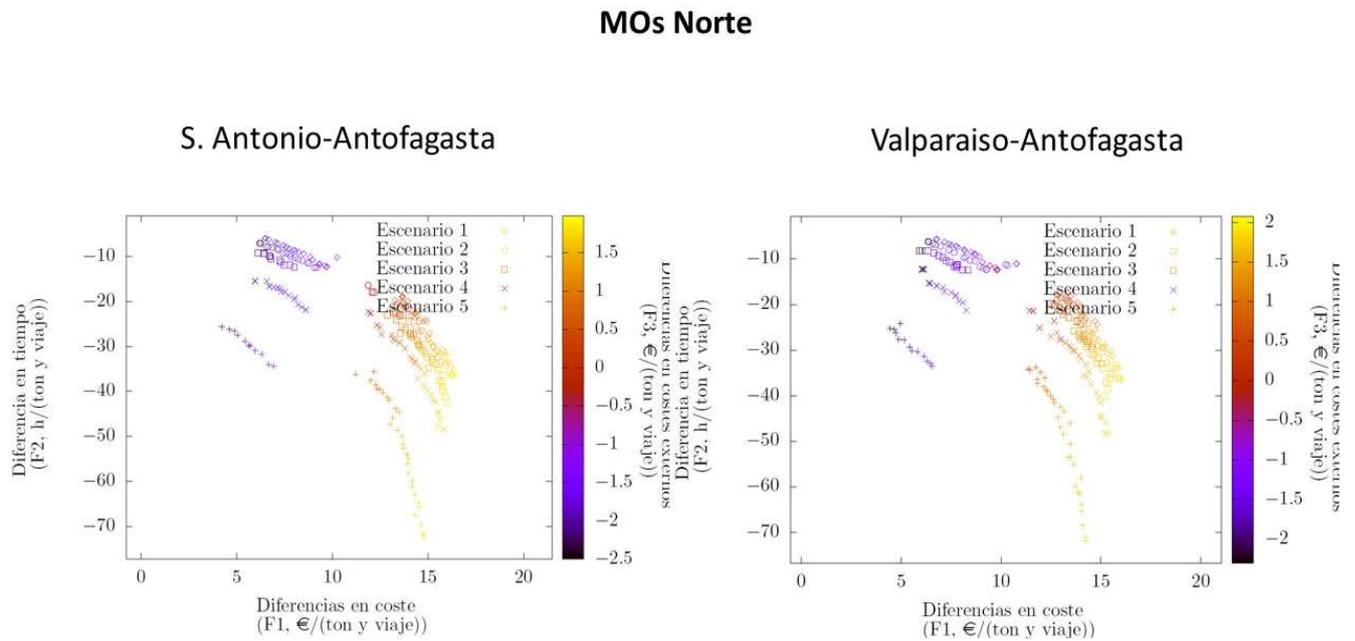
La variación del número máximo de grúas corresponde con aquellas cuyo tipo supone mayor rendimiento para cada puerto. Cabe recordar que el cálculo del número de grúas máximas que operan en cada puerto por buque ( $NG_m; \forall m \in M$   $NG_k; \forall k \in K$ ) son números enteros, funciones escalonadas, limitados por el número máximo de grúas disponibles en puerto ( $NMG_m; \forall m \in M; NMG_k; \forall k \in K$ ).

En la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 se pueden apreciar los resultados obtenidos para Antofagasta, San Vicente y Coronel.

En las MOs articuladas a través de Antofagasta y Coronel se puede apreciar una influencia significativa de las grúas en el tiempo invertido en el transporte (ver Figura 31 y Figura 33) tal y como se esperaba. Sin embargo, en ambos casos la ventaja obtenida por disponer de una o dos grúas más a las actuales en puerto (escenarios 1 y 2) es mucho menor a la desventaja de contar con una o dos grúas

menos (escenarios 4 y 5). Esto es así debido a que los buques obtenidos no son suficientemente grandes como para que puedan actuar sobre ellos demasiadas grúas a la vez.

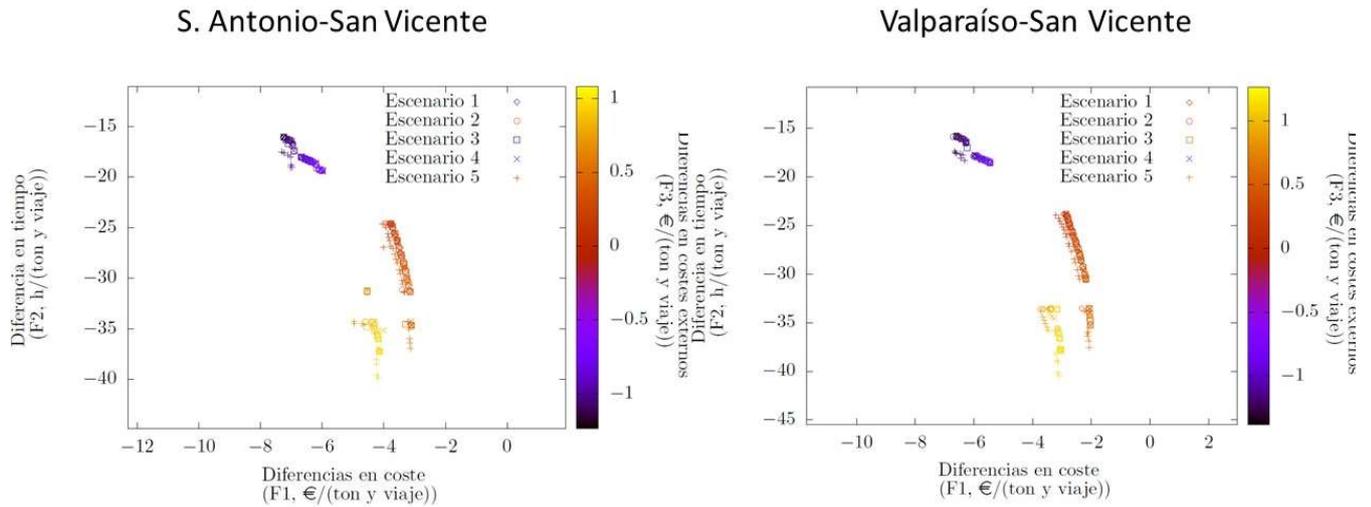
**Figura 31. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta al máximo número de grúas disponibles en puerto**



En la Figura 32 podemos observar que para las MOs articuladas a través de San Vicente la modificación del número máximo de grúas no tendría ninguna consecuencia relevante en la competitividad de las rutas intermodales; Las soluciones obtenidas para todos los escenarios son coincidentes en un único frente de Pareto.

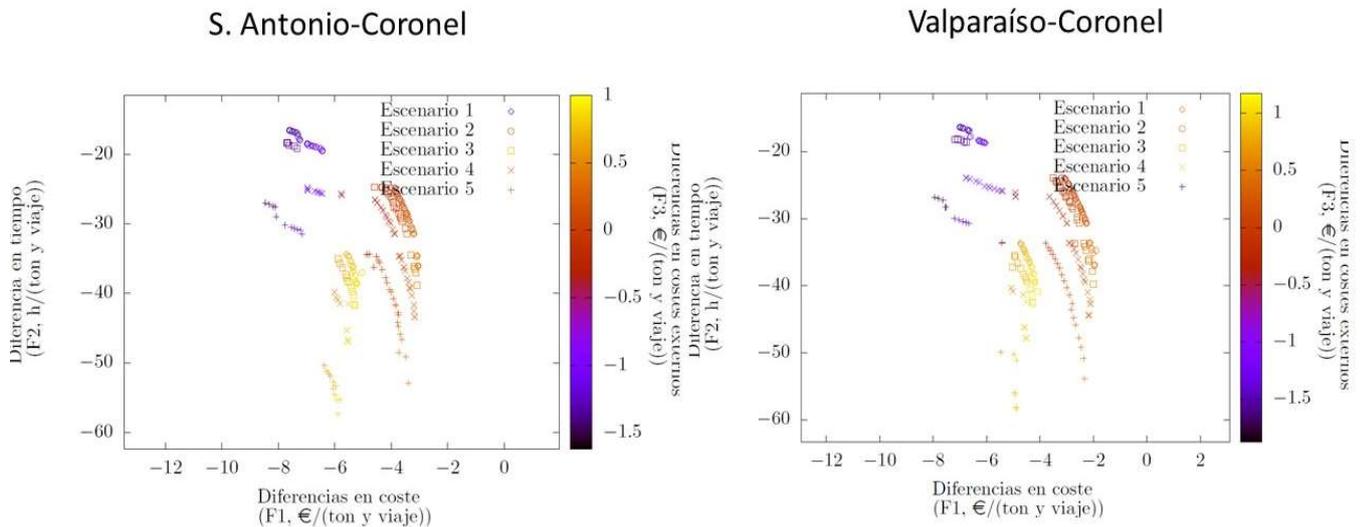
**Figura 32. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente al máximo número de grúas disponibles en puerto**

**MOs Sur desde San Vicente**



**Figura 33. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel al máximo número de grúas disponibles en puerto**

**MOs Sur desde Coronel**



En la Tabla 40 se puede apreciar el efecto sobre la competitividad de las cadenas intermodales operadas con flotas optimizadas (ver Tabla 35) del incremento del número máximo de grúas en los puertos propuestos para articular autopistas del mar.

El incremento de una o dos grúas más en Antofagasta podría mejorar la competitividad en tiempo (F2) de las cadenas multimodales en 2,50 horas para la

MOs a través de San Antonio y 3,26 horas para la MOs a través de Valparaiso. Si bien la mejora en competitividad no sería significativa considerando el retraso total resultante con respecto al transporte unimodal (19,66 horas y 17,74 horas para San Antonio y Valparaiso respectivamente, ver Tabla 40) consecuentemente apenas tendrá una repercusión en costes (F1). Sin embargo, la penalización en tiempo que supondría operar en Antofagasta con una sola grúa (escenario 5) sería muy importante, de 13,98 horas de retraso respecto a los resultados del escenario base para la MOs a través de San Antonio y de 12,76 horas de retraso para Valparaiso. Esta penalización en el tiempo de carga y descarga tendrá también como consecuencia un detrimento de la competitividad en costes (F1, ver Tabla 40).

En el caso de la MOs sur a través de San Vicente el incremento de una grúa o su reducción no causaría impacto ni en tiempo ni en coste respecto a los valores base. Sólo la reducción de dos grúas supondría una penalización de 1,5 horas y 2 horas para San Antonio y Valparaiso respectivamente, en absoluto significativa frente a las horas de retraso en los casos base de las cadenas intermodales (F2=25,41h y F2=25,71 horas, ver Tabla 40) con respecto a la carretera. Esto es así dado que la capacidad actual de grúas en todos los puertos de las MOs: San Vicente, Valparaiso y San Antonio resulta suficiente para las flotas encontradas como óptimas, es decir el número de grúas óptimo a utilizar por el barco resulta menor que el máximo estudiado en todos los escenarios evaluados.

**Tabla 40. Sensibilidad al número máximo de grúas del transporte por carretera de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas**

	<b>Antofagasta</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	12,79	-17,74	0,82
	Escenario2 (110%)	12,83	-18,94	0,85
	Escenario3 (100%)	12,92	-21,00	0,87
	Escenario4 (90%)	12,66	-23,62	0,78
	Escenario5 (85%)	11,74	-33,76	0,70
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	13,26	-19,66	0,74
	Escenario2 (110%)	13,32	-20,68	0,70
	Escenario3 (100%)	13,26	-22,17	0,71
	Escenario4 (90%)	12,49	-25,69	0,73
	Escenario5 (85%)	11,21	-36,15	0,71
	<b>San Vicente</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	-3,28	-25,22	0,30
	Escenario2 (110%)	-3,23	-25,66	0,33
	Escenario3 (100%)	-3,23	-25,70	0,33
	Escenario4 (90%)	-3,23	-25,55	0,33
	Escenario5 (85%)	-3,25	-27,65	0,33
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	-4,28	-25,14	0,24
	Escenario2 (110%)	-4,28	-25,00	0,24
	Escenario3 (100%)	-4,24	-25,41	0,26
	Escenario4 (90%)	-4,22	-25,50	0,26
	Escenario5 (85%)	-4,29	-27,05	0,25

Finalmente indicar que el comportamiento de las MOs sur a través de Coronel resulta muy similar al de las MOs norte dado el reducido número de grúas máximo de Coronel. Cuando se asumen dos grúas más respecto a las grúas base disponibles en Coronel (escenario 1, ver Figura 33 ), supondría ahorros de tiempo de 1,5 horas en la cadena intermodal, aunque no afectaría significativamente al coste. Por otro lado la penalización por disminución de dos grúas resulta mucho más severa. El escenario 5 evalúa el caso de dos grúas menos en Coronel esto supone penalizaciones de tiempo de 10 horas respecto a los resultados obtenidos en escenario base en la cadena intermodal este hecho tiene además una penalización importante en costes. Por tanto el número de grúas máximas disponibles en Coronel (3 en el escenario actual, escenario 3 en la Figura 33) tendrá una influencia muy significativa en los resultados esperados tanto en tiempo como en coste.

Por tanto, podemos concluir que un incremento de una o dos grúas en el puerto de San Vicente no tendría consecuencias mientras que en los puertos de Antofagasta y Coronel llevaría a mejoras moderadas de la competitividad en tiempo de las cadenas, pero en ningún caso significativas, considerando los retrasos esperados respecto a la carretera. Una disminución de una o dos grúas en San Vicente tampoco tendría consecuencias relevantes mientras que el impacto sería muy importante en las cadenas articuladas a través de Antofagasta y de Coronel.

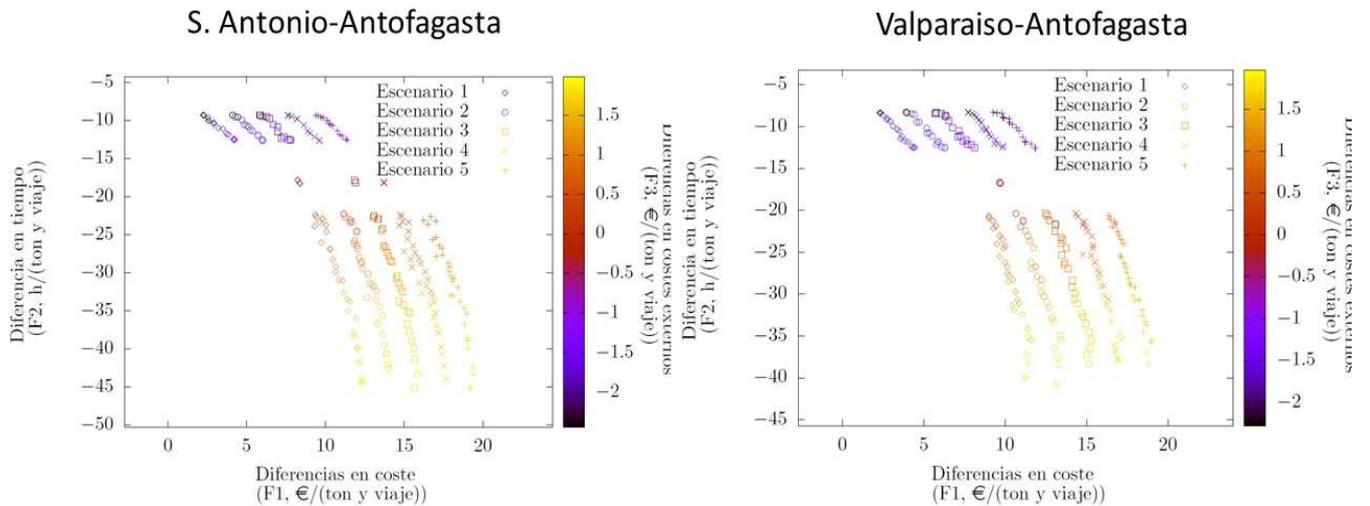
#### **4.9.2.2.2 Las tasas portuarias dependientes de las autoridades portuarias**

En este grupo se han seleccionado aquellas tasas fijadas por las autoridades marítimas a través de las terminales portuarias: la tasa por uso del muelle al buque ( $CT_7$ ), tasa por uso de muelle a la mercancía ( $CT_8$ ); costes de carga y descarga (transferencia de la carga)( $CT_{12}$ ).

Se han evaluado todas a la vez. Es decir, en cada escenario de análisis se han subido o bajado todas ellas proporcionalmente respecto a sus valores base. Tal y como se puede apreciar en las figuras siguientes (Figura 34, Figura 35 y Figura 36) su influencia es relevante en los valores de competitividad en coste (valor F1). La influencia de las tarifas portuarias en la competitividad del transporte marítimo de corta distancia ha sido estudiado profusamente en la última década (Paixao and Marlow, 2002; Sauri, 2006, Grosso et al., 2010; entre otros). Sin embargo, los resultados hallados por los diferentes autores, si bien todos ellos reconocen el impacto relevante de los mismos, no son unánimes en la determinación de que las tarifas portuarias sean los costes más influyentes en la competitividad en coste del transporte marítimo de corta distancia.

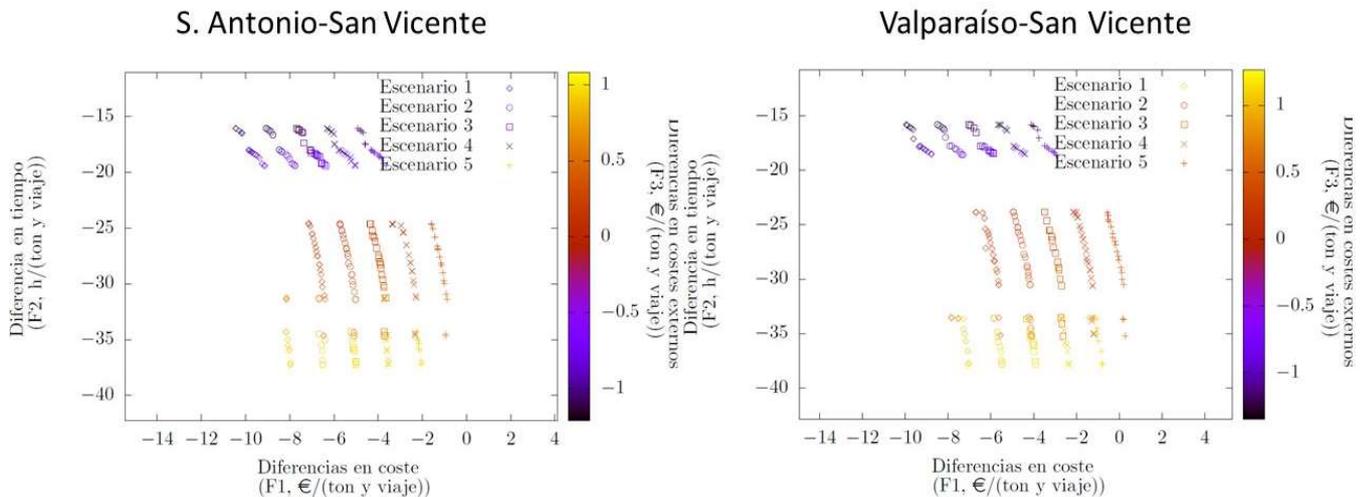
**Figura 34. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria**

**MOs Norte**



**Figura 35. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria**

**MOs Sur desde San Vicente**

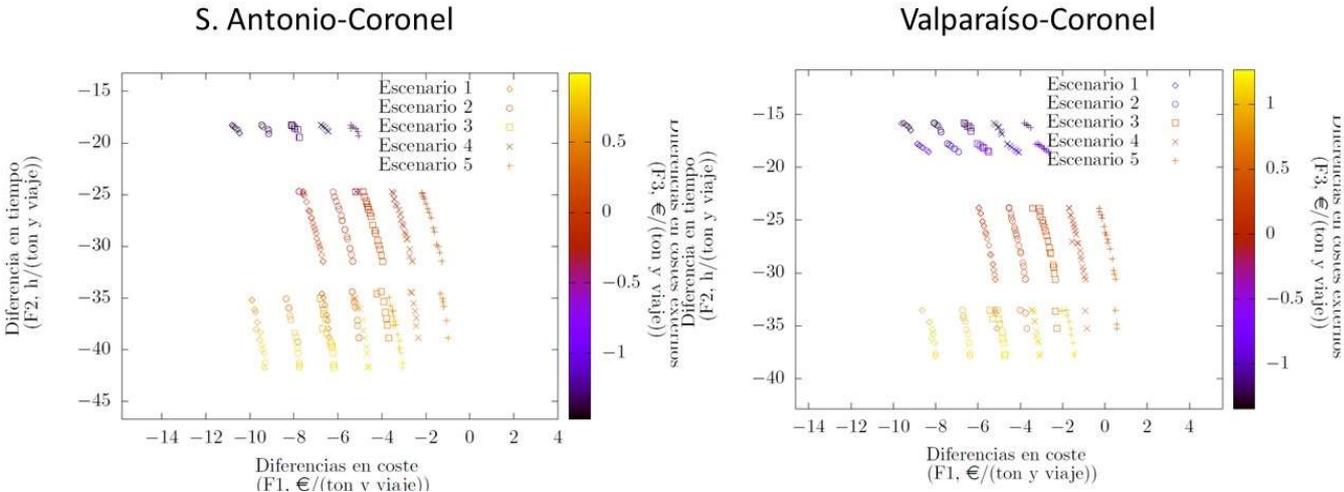


En la Tabla 41 se puede apreciar la sensibilidad de la competitividad de las cadenas intermodales operadas con flotas optimizadas (ver Tabla 35) a través de las MOs propuestas a la variación del coste de las tarifas: la tasa por uso del muelle al buque ( $CT_7$ ), tasa por uso de muelle a la mercancía ( $CT_8$ ) y costes de carga y descarga (transferencia de la carga;  $CT_{12}$ ). Es interesante destacar que en las MOs norte, articuladas a través de ambos posibles *hubs*, por cada variación del 10% de las tasas estudiadas se reduce o incrementa la competitividad de las cadenas intermodales en 1,75 €/t y viaje y un 1,45 €/t y viaje en las MOs sur. Esto tiene

gran influencia en la MOs sur donde la ventaja de las cadenas intermodales en costes es muy limitada. Para que estas rutas intermodales alcanzasen valores positivos en competitividad en costes sería necesario que las tarifas portuarias analizadas se redujesen un 30% en el caso de las MOs sur con Valparaíso y un 40% con San Antonio.

**Figura 36. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria**

**MOs Sur desde Coronel**



**Tabla 41. Sensibilidad a las tarifas portuarias dependientes de la autoridad portuaria de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas**

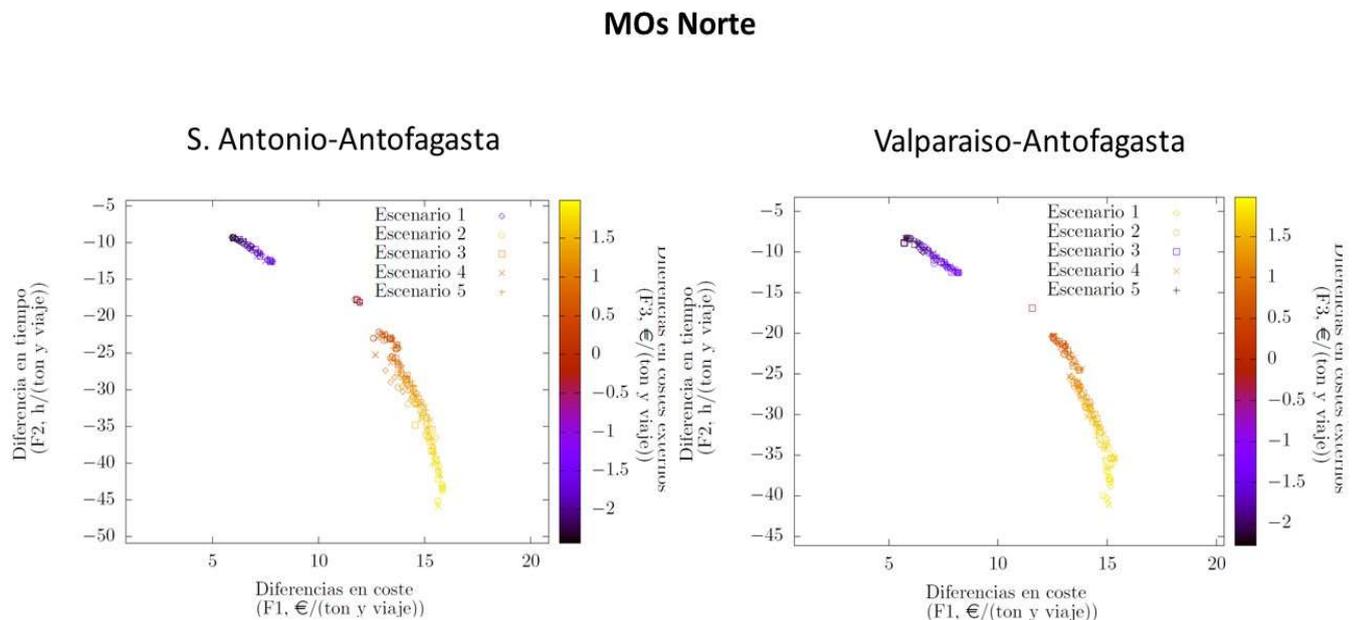
	<b>Antofagasta</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	9,28	-22,13	0,98
	Escenario2 (110%)	10,66	-20,39	0,77
	Escenario3 (100%)	12,92	-21,00	0,87
	Escenario4 (90%)	14,47	-20,76	0,77
	Escenario5 (80%)	16,59	-21,97	0,96
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	9,42	-22,61	0,73
	Escenario2 (110%)	11,26	-22,70	0,73
	Escenario3 (100%)	13,26	-22,17	0,71
	Escenario4 (90%)	14,75	-22,34	0,68
	Escenario5 (80%)	16,23	-23,09	0,72
	<b>San Vicente</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	-6,21	-25,05	0,29
	Escenario2 (110%)	-4,73	-25,29	0,30
	Escenario3 (100%)	-3,23	-25,70	0,33
	Escenario4 (90%)	-1,74	-25,95	0,34
	Escenario5 (80%)	-0,33	-25,61	0,32
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	-7,03	-25,31	0,24
	Escenario2 (110%)	-5,62	-25,34	0,26
	Escenario3 (100%)	-4,24	-25,41	0,26
	Escenario4 (90%)	-2,88	-25,60	0,27
	Escenario5 (80%)	-1,49	-25,25	0,25

### 4.9.2.2.3 Las tasas portuarias no dependientes de las autoridades portuarias

En este grupo se han incluido los costes por práctico ( $CT_9$ ) y por remolcador ( $CT_{10}$ ). Si bien los primeros en Chile son impuestos por la Dirección General del Territorio y de la Marina Mercante, los segundos son fijados por empresas portuarias. En cualquier caso, la obligatoriedad de estos servicios viene definida por las capitanías de los puertos correspondientes en función de las características de los propios puertos, buques, formación de los capitanes que operen los buques y condiciones climatológicas imperantes.

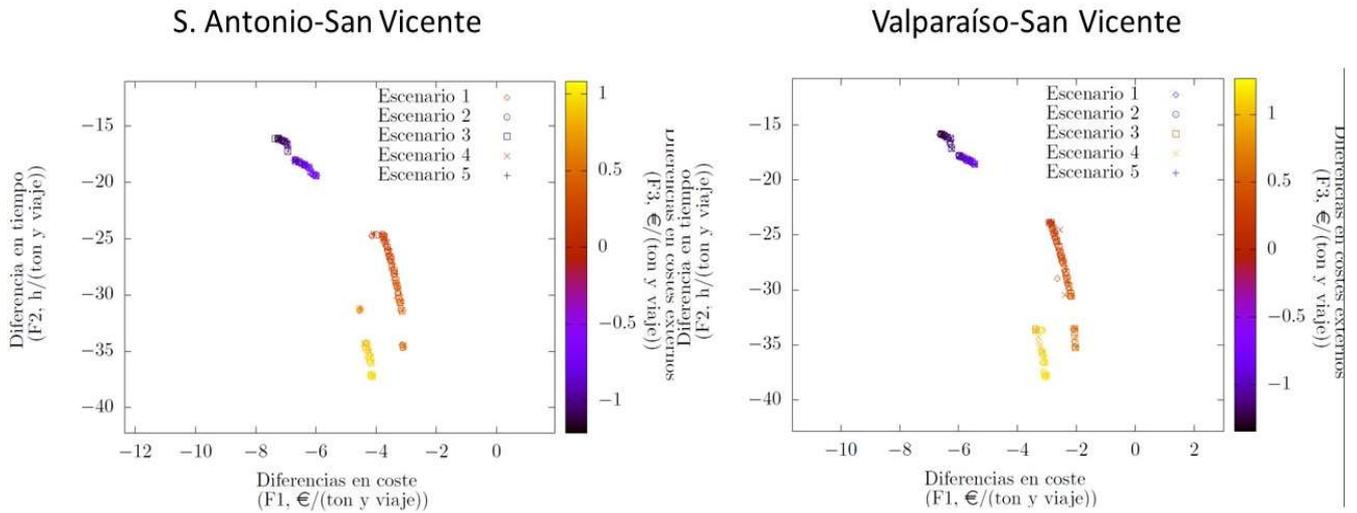
Como en la sección anterior, los escenarios de análisis evalúan las modificaciones de ambas tarifas a la vez.

**Figura 37. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria**



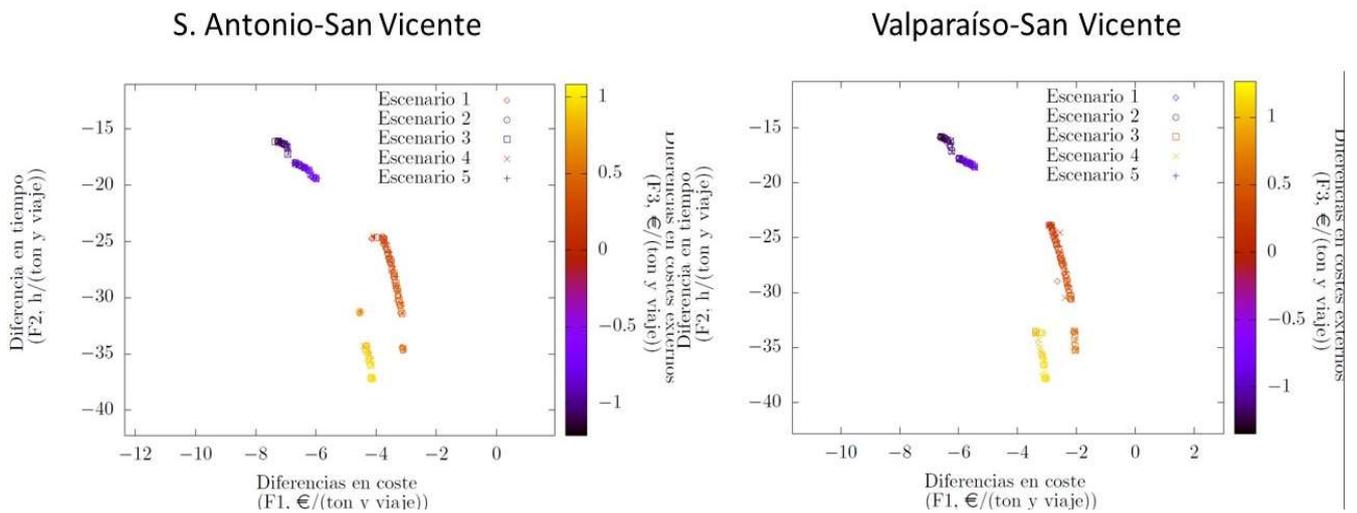
**Figura 38. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria**

**MOs Sur desde San Vicente**



**Figura 39. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria**

**MOs Sur desde San Vicente**



En la Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se aprecia que las soluciones obtenidas en todos los escenarios convergen en un único frente de Pareto. En otras palabras, el impacto de la modificación de estas tarifas para todas las rutas es despreciable en términos de competitividad en tiempo (F1) de las rutas intermodales. Este hecho puede apreciarse numéricamente en la Tabla 42 que recoge el comportamiento de las cadenas intermodales operadas a través de las MOs San Antonio-Antofagasta y San Antonio-San Vicente con las flotas propuestas como óptimas en la Tabla 35.

**Tabla 42. Sensibilidad a las tarifas portuarias no dependientes de la autoridad portuaria de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas**

	<b>Antofagasta</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	12,62	-21,01	0,85
	Escenario2 (110%)	12,68	-20,96	0,83
	Escenario3 (100%)	12,92	-21,00	0,87
	Escenario4 (90%)	12,67	-20,86	0,82
	Escenario5 (80%)	12,78	-21,22	0,88
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	12,90	-22,38	0,70
	Escenario2 (110%)	12,83	-22,16	0,67
	Escenario3 (100%)	13,26	-22,17	0,71
	Escenario4 (90%)	13,06	-22,41	0,68
	Escenario5 (80%)	13,03	-22,36	0,68
	<b>San Vicente</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario1 (120%)	-3,27	-25,62	0,33
	Escenario2 (110%)	-3,26	-25,62	0,33
	Escenario3 (100%)	-3,23	-25,70	0,33
	Escenario4 (90%)	-3,22	-25,52	0,32
	Escenario5 (80%)	-3,17	-25,76	0,33
<b>San Antonio</b>	Escenario1 (120%)	-4,35	-25,25	0,25
	Escenario2 (110%)	-4,26	-25,44	0,26
	Escenario3 (100%)	-4,24	-25,41	0,26
	Escenario4 (90%)	-4,22	-25,48	0,26
	Escenario5 (80%)	-4,22	-25,15	0,25

La modificación del coste tarifarios determinado por las autoridades portuarias influía 1,75 €/t y viaje en las MOs norte y un 1,45 €/t y viaje en las MOs sur una en ventaja o desventaja (valor de F1) de la intermodalidad respecto a la alternativa unimodal por cada variación del 10% de las tarifas base. El impacto de la misma modificación del coste unitario de la carretera resulta ser mucho más importante para las MOs norte, siendo su influencia de una media de 3,6€/t y viaje a través de Antofagasta y sin embargo menos relevante para la MOs sur a través de San Vicente, siendo esta de 1,20€/t y viaje. Por tanto, si bien el coste unitario del transporte por carretera influirá de manera significativa en la competitividad de las cadenas intermodales, las cadenas norteñas serán más sensibles a su impacto que las sureñas. Estas últimas podrían equilibrar dicha variación (no controlable) con una modificación proporcional en sus tarifas portuarias, ya que la influencia de estas sobre la competitividad de la intermodalidad resulta ser más relevante.

Las cadenas norteñas sin embargo no contarían con esta oportunidad; sería necesario el doble de modificación porcentual en sus tarifas para equilibrar una modificación en el coste unitario del transporte por carretera.

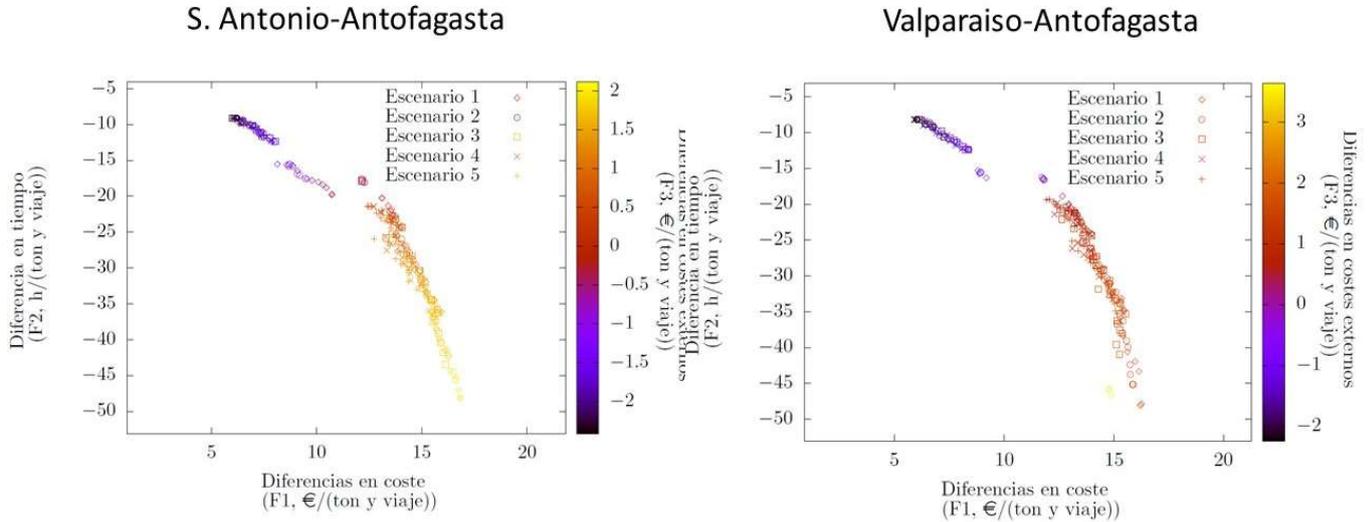
#### **4.9.2.3 Evaluación de la influencia de la demanda.**

La definición de la flota óptima para el establecimiento de una autopista del mar integrada en una cadena intermodal está condicionada inequívocamente por la demanda prevista de servicio. Es decir, la búsqueda de la flota óptima pretende maximizar las oportunidades de éxito de una cadena intermodal que debe ofrecer un servicio de transporte puerta a puerta para una demanda anual determinada. Por lo tanto, la modificación de esta demanda condicionará la flota encontrada. Este atributo, fundamental en la optimización, es incluido en el modelo a través de tres restricciones: RR10, RR12 y RR13 (ver Tabla 25). Estas restricciones relacionan las variables de optimización que garantizan el cumplimiento de los requisitos de demanda, estas son: el número de buques de la flota (NB), su capacidad ( $G_p; \forall p \in PP$ ), su velocidad (VB) y el número de viajes anuales que la flota ofrece ( $N_{trips}$ ), es decir, la frecuencia de la línea. Tal y como se puede ver en la Tabla 25 los valores de demanda estimada (ver también Tabla 23) se toman como valores de capacidad mínima anual total y considerando las necesidades en cada sentido que debe ofrecer la MOs (ver Tabla 25). De hecho, las flotas propuestas en la Tabla 35, ofrecen mayor capacidad de movimiento de mercancías anual que el requerido (un 3% superior para Valparaíso-Antofagasta, 5,4% superior para San Antonio-Antofagasta, un 0,1% para Valparaíso-San Vicente y un 0,25% superior para San Antonio-San Vicente). Sin embargo, la capacidad del buque es la misma en ambos sentidos mientras que la demanda no lo es (ver Tabla 24). Esto supone que la ratio de ocupación del buque no será del 100% en ambos sentidos (ratios del 74,2% y 60,3% de media en las MOs norte y sur respectivamente sobre capacidad total anual de la flota), sin embargo se ha considerado como tal en el proceso de optimización.

Por otro lado la evolución de la demanda en el tiempo lleva a plantear si para modificaciones moderadas de la demanda (por exceso o por defecto) la flota propuesta estaría muy alejada de la óptima para la nueva demanda y por tanto los resultados de competitividad de la cadena intermodal caerían respecto a los esperados en el *escenario actual*. Con objeto de evaluar los aspectos anteriores se analizará diferentes escenarios en las MOs norte y sur sobre los valores de demanda considerados en el escenario actual, incrementos y reducciones de hasta un 20% tanto en demanda total anual como por sentido (ver Tabla 23 y Tabla 24).

**Figura 40. Resultados de sensibilidad para las MOs norte a través de Antofagasta a la demanda**

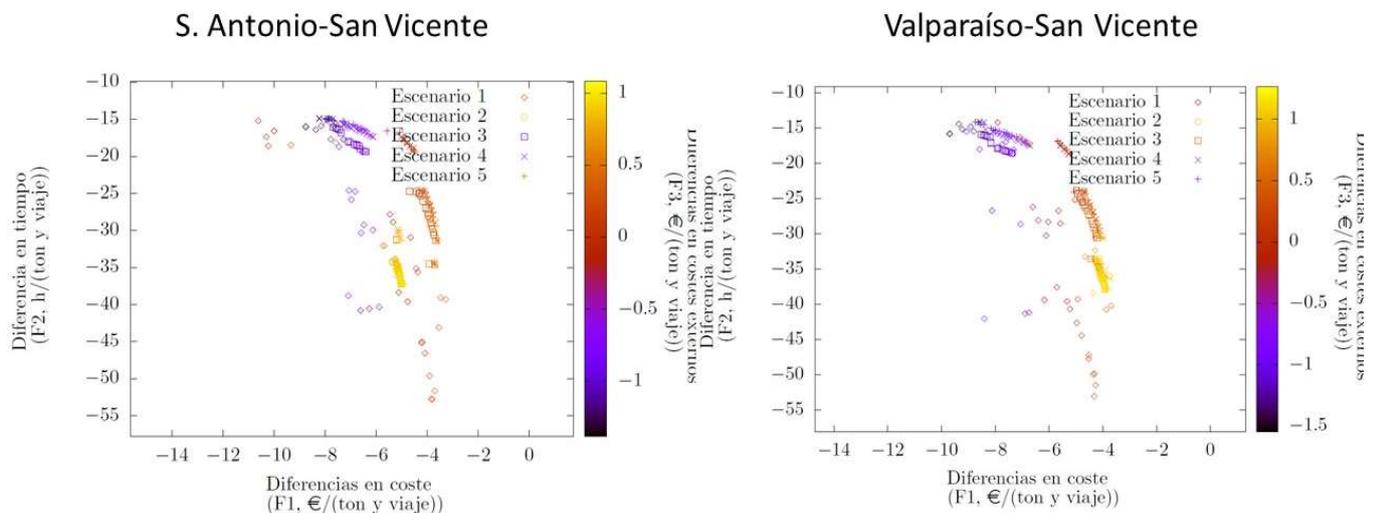
**MOs Norte**



En la Figura 40 se aprecia que, para las MOs norte a través de Antofagasta, modificaciones de hasta un 20% sobre la demanda base conducen a flotas óptimas similares (convergencia en un único frente de Pareto). Por lo tanto, existe cierta certeza de que las flotas sugeridas en la Tabla 35 para las MOs norte tendrán buen comportamiento (modificaciones aceptables en términos de competitividad relativa del transporte intermodal) ante modificaciones moderadas de la demanda base.

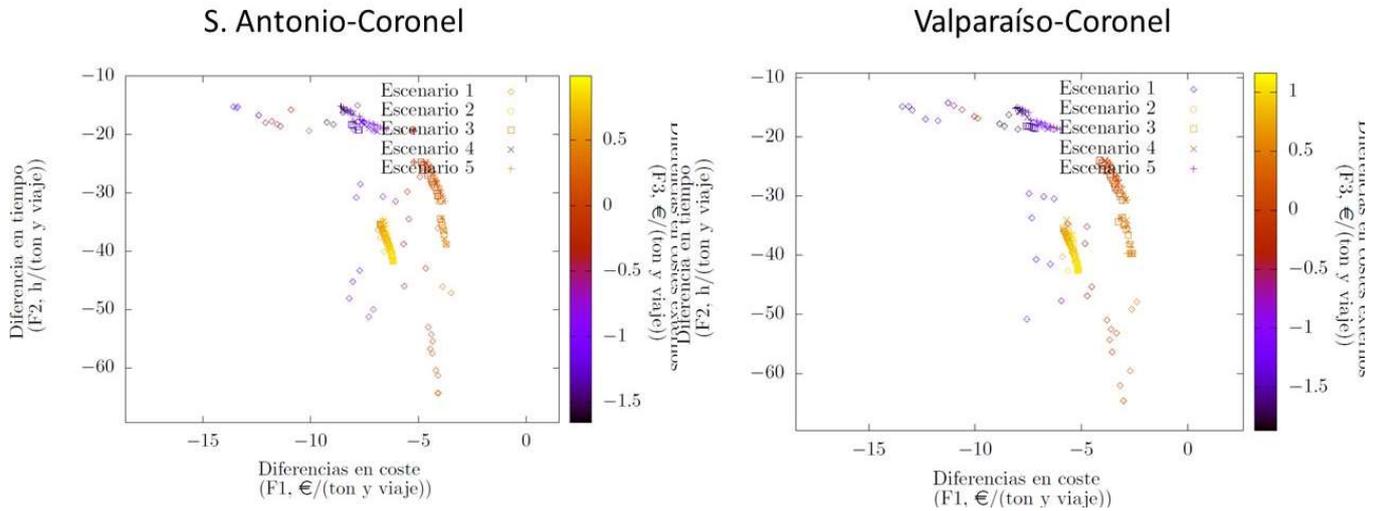
**Figura 41. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de San Vicente a la demanda**

**MOs Sur desde San Vicente**



**Figura 42. Resultados de sensibilidad para las MOs sur a través de Coronel a la demanda**

**MOs Sur desde Coronel**



En la Figura 41 y Figura 42 se aprecian los resultados obtenidos para las optimizaciones de flota en los diferentes escenarios para las MOs sur. Para todas ellas se aprecia que las flotas óptimas convergen en un frente de Pareto común cuando la demanda corresponde a los escenarios del 2 al 5 (110%,100%; 90% y 80%) sin embargo para la demanda correspondiente al escenario 1 (120% demanda base) las soluciones obtenidas están muy dispersas y alejadas del frente de Pareto común (ver Figura 41 y Figura 42). Se intuye por tanto que en este escenario el comportamiento de la cadena intermodal operando con la flota sugerida como óptima en la Tabla 35 se modificará significativamente respecto al obtenido en el escenario actual.

**Tabla 43. Flotas óptimas obtenidas para las MOs norte y sur en los escenarios que implican incremento de demanda con el *hub* Valparaíso**

MOs	Valparaíso- Antofagasta			Valparaíso-San Vicente		
	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)
Escenario (demanda base)	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	TEUs	TEUs
Capacidad carga (G <sub>p</sub> )	579 TEUs	715 TEUs	854 TEUs	1.312 TEUs	1.329 TEUs	1.332 TEUs
Velocidad buque (Kn)	18	18,29	20,70	19,00	16,75	16,41
Edad de los buques (E <sub>a</sub> )	14 (E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )
Bow thruster	Sí(MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )	No (MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )
Sistemas de carga	Grúa Puerto (MG <sub>2</sub> )	Port cranes (MG <sub>2</sub> )				
Número de buques (NB)	4	4	4	3	4	4
Viajes anuales (N)	669	657	672	670	672	651
L (m)	118,36	127,21	139,40	158,00	157,62	159,12
B (m)	20,13	21,40	24,39	27,36	25,82	26,00
D (m)	9,84	10,52	11,74	13,29	12,62	12,70
GT (Ton)	6.658	7.992	10.488	15.283	14.619	15.163
Tipo de propulsor	Hélice Convencional (TP <sub>1</sub> )					
Nº Líneas ejes	1 (NSL <sub>1</sub> )					
Tipo motor propulsor	Diesel (TME <sub>1</sub> )					
Número Motores	1 (NME <sub>1</sub> )					
F1(€/ (txviaje))	12,92	13,50	13,60	-3,22	-3,85	-3,89
F2(h/(txviaje))	-21,00	-22,48	-23,05	-25,68	-34,63	-35,03
F3(€/ (txviaje))	0,87	0,93	0,71	0,33	1,05	1,05

**Tabla 44. Flotas óptimas obtenidas para las MOs norte y sur en los escenarios que implican incremento de demanda con el *hub* San Antonio**

MOs	San Antonio- Antofagasta			San Antonio-San Vicente		
	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)
Escenario (demanda base)	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)	Escenario3 (100%)	Escenario2 (110%)	Escenario1 (120%)
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	TEUs	TEUs
Capacidad carga (G <sub>p</sub> )	583 TEUs	689 TEUs	854 TEUs	1.311 TEUs	1.329 TEUs	1.380 TEUs
Velocidad buque (Kn)	18	18,60	20,65	19,33	16,67	18,60
Edad de los buques (E <sub>a</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )	14(E <sub>3</sub> )
Bow thruster	Si (MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )	No (MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )	Si (MM <sub>2</sub> )	No(MM <sub>2</sub> )
Sistemas de carga	Port cranes (MG <sub>2</sub> )					
Número de buques (NB)	4	4	4	3	4	4
Viajes anuales (N)	671	670	668	671	672	740
L (m)	119,23	126,63	138,46	158,00	157,60	160,47
B (m)	20,25	21,32	24,24	27,38	25,80	26,24
D (m)	9,90	10,48	11,67	13,31	12,62	12,87
GT (Ton)	6.746	7.849	10.308	15.251	14.650	14.684
Tipo de propulsor	Hélice Convencional (TP <sub>1</sub> )					
Nº Líneas ejes	1 (NSL <sub>1</sub> )					
Tipo motor propulsor	Diesel (TME <sub>1</sub> )					
Número Motores	1 (NME <sub>1</sub> )					
F1(€/ (txviaje))	13,26	13,77	14,01	-4,24	-4,91	-5,25
F2(h/(txviaje))	-22,17	-23,33	-24,33	-25,41	-34,28	-34,36
F3(€/ (txviaje))	0,71	0,77	0,63	0,26	0,87	0,78

En la Tabla 43 y Tabla 44 se pueden ver las flotas óptimas cuando la demanda supera a la demanda base. Las flotas obtenidas para las MOs articuladas mediante ambos *hubs* son muy similares entre sí, cumpliéndose además la conducta ya señalada para el caso base (*escenario actual*) en todos los escenarios analizados: para las MOs norte, San Antonio articula rutas intermodales más baratas y lentas y en la MOs sur es Valparaíso el que genera las cadenas más baratas y lentas.

Para el caso de las MOs norte (Valparaíso-Antofagasta y San Antonio-Antofagasta) para los escenarios 4 y 5 se obtuvieron buques ligeramente más grandes y más rápidos que los obtenidos para el escenario actual (escenario 3) pero con el mismo número de buques (4), consecuentemente las cadenas intermodales se ven penalizadas en tiempo respecto a las evaluadas para el escenario base (entre 1 y 2.25 horas) y ligeramente beneficiadas en costes por los efectos de economía de

escala superiores al perjuicio del ligero incremento del tiempo de estancia en puerto de los nuevos buques. Sin embargo, para las MOs sur (Valparaiso-San Vicente y San Antonio-San Vicente), no se han encontrado soluciones viables capaces de abastecer un incremento de la demanda con tres buques. En este caso los buques obtenidos han constituido flotas de 4 buques, ligeramente más grandes y lentos. Esto no sólo penalizan la competitividad de las cadenas intermodales en tiempo sino también en coste, ya que al incremento del coste en las operaciones de carga hay que incrementar el coste de la tasa del buque (muellaje de la nave, CT<sub>7</sub>, ver Tabla 32 y Tabla 33) cuyo tarifa depende del tiempo de estancia del buque en puerto.

En la evaluación del comportamiento de la intermodalidad al disminuir la demanda o reducirse la ratio de ocupación de los buques de las flotas obtenidas en el escenario actual (ver Tabla 45 situación real para estas MOs debido al desequilibrio entre sentidos), apenas verían penalizada su ventaja en costes mientras que mejorarían sensiblemente su competitividad en tiempo respecto a los resultados obtenidos en el escenario base (escenario 3) ya que reducirían sus tiempos de carga descarga (TVB2).

**Tabla 45. Sensibilidad a la demanda de las rutas multimodales articuladas a través de las MOs norte y sur operando con flotas optimizadas**

	<b>Antofagasta</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario3 (100%)	12,92	-21,00	0,87
	Escenario4 (90%)	12,80	-20,69	0,85
	Escenario5 (80%)	12,56	-20,55	0,85
<b>San Antonio</b>	Escenario3 (100%)	13,26	-22,17	0,71
	Escenario4 (90%)	13,05	-22,14	0,72
	Escenario5 (80%)	13,10	-22,01	0,71
	<b>San Vicente</b>	<b>F1(€/t viaje)</b>	<b>F2 (h/t viaje)</b>	<b>F3 (€/t viaje)</b>
<b>Valparaiso</b>	Escenario3 (100%)	-3,23	-25,70	0,33
	Escenario4 (90%)	-3,13	-24,76	0,39
	Escenario5 (80%)	-3,25	-23,83	0,33
<b>San Antonio</b>	Escenario3 (100%)	-4,24	-25,41	0,26
	Escenario4 (90%)	-4,12	-24,75	0,32
	Escenario5 (80%)	-4,25	-24,66	0,36

Para ser rigurosos en el análisis de resultados hay que tener en cuenta que las flotas sugeridas como óptimas (ver Tabla 34 y Tabla 35) y que se han obtenido para el escenario actual (escenario3) ofrecen un sobredimensionamiento de capacidad anual sobre la estimada para el escenario actual (ver Tabla 23y Tabla 24): 3,03% para Valparaiso-Antofagasta, del 5,42% para San Antonio-Antofagasta, del 0,1% para Valparaiso-San Vicente y del 0,25% para San Antonio-

San Vicente. Por tanto, la utilización de las flotas sugeridas en la Tabla 43 para incrementos de demanda anual tendrían sentido para demandas por encima de las anteriores sobre la demanda base anual. Por otro lado los resultados de competitividad alcanzados en caso de incremento de demanda operando con flotas optimizadas en las MOs norte (ver Tabla 43 y Tabla 44) sugieren penalizaciones en tiempo, atributo ya desfavorable en el escenario actual. Respecto a las MOs sur, el incremento de la demanda actual obligaría a recurrir a las flotas mostradas en la Tabla 43 y Tabla 44. En este caso no sólo la desventaja en tiempo se incrementaría de forma importante, sino que el hecho de operar con un buque más en la flota incrementaría el coste de la intermodalidad lo suficiente para no ser en absoluto competitivo en coste frente a la carretera.

Por otro lado es importante recordar que en el escenario actual el desequilibrio de la demanda entre sentidos se traduce en una ratio de ocupación anual de la flota obtenida en el escenario actual (escenario 3, con demanda base) no alcanza el 100% anual sino el 74% en la MOs norte, es decir los resultados de competitividad realmente esperados son los mostrados en la Tabla 45 (escenario 5). Es decir, mejora en la competitividad en tiempo respecto al escenario actual (escenario 3). En la MOs sur, sucede lo mismo, en los escenarios donde se simulan reducciones de la ratio de ocupación de los buques se reduce su ventaja en costes y su desventaja en tiempo. En el caso de la MOs sur la ratio de ocupación medio anual según la demanda actual (ver Tabla 23 y Tabla 24 ) es del 60,30%, ratio muy alejada de cualquier escenario de análisis de sensibilidad.

Según lo expuesto, se puede concluir que para la MOs norte, debido a los desequilibrios en la línea, se esperan resultados de competitividad en costes algo menos abultados que los obtenidos para el escenario actual (ver escenario 3, ver Tabla 45) pero más competitiva en plazos. Estas desviaciones respecto a lo obtenido en el escenario actual en costes (escenario 3) se reducirían con incrementos en la demanda sur-norte de hasta el 50%. Por ejemplo, mediante captación de tráfico de cabotaje que actualmente emplea la carretera (como el *retail*). En la MOs sur, la ratio de ocupación actual sería inasumible, es decir, sería de nuevo imprescindible equilibrar el servicio de tráfico marítimo en la dirección centro-sur. Como en el caso de la MOs norte si se consiguiesen ratios de ocupación total del 80% nos ofrecerían líneas algo menos competitivas en costes y algo más competitivas en tiempos respecto al escenario base.

Si el incremento de la demanda total superase el 3% en la MOs norte y el actual en las MOs sur y si además se mantuviese el desequilibrio actual entre sentidos, las flotas necesarias contarían con un buque más en las MOs sur ofreciendo una alternativa intermodal no asumible frente a la carretera. Sin embargo, en la MOs norte flotas con el mismo número de buques, pero ligeramente más grandes seguirían ofreciendo alternativas intermodales más competitivas en costes, y por tanto interesantes para ciertos productos.

### **4.9.3 Conclusiones de la sensibilización**

De la sensibilización de la velocidad máxima permitida de tránsito por carretera, se ha concluido que los resultados en competitividad de las rutas intermodales operando con las flotas optimizadas se verán afectados significativamente en las MOs norte en términos de tiempo, especialmente si la velocidad media del camión supera los 90Km/h (suponiendo hasta 6 horas adicionales de retraso de la intermodalidad frente a la unimodalidad), mientras que las cadenas articuladas a través de la MOs sur apenas sufrirán modificaciones relevantes en competitividad relativa debido a su corta distancia total de ruta 'puerta a puerta' (507 km). Por otro lado, en caso de que la velocidad máxima del camión se reduzca un 20% (velocidad media de 72 km/h), escenario probable teniendo en cuenta las incidencias del tráfico por carretera (congestión, semáforos, peajes, etc) la intermodalidad a través de la MOs norte reduciría su desventaja en tiempo respecto a la carretera en unas 3,6 horas respecto a lo esperado inicialmente (17,4 y 18,57 horas de retraso respecto a la carretera para Valparaiso y San Antonio respectivamente).

Considerando la sensibilidad al coste unitario del transporte por carretera, se ha encontrado que modificaciones del 10% en este valor supondrían abaratamientos o encarecimientos de 3,6€/t y viaje en las cadenas articuladas a través de las MOs norte y de 1,20€/t y viaje en aquellas articuladas a través de las MOs sur. Considerando que los valores unitarios de transporte por carretera de referencia empleados para el escenario actual no incluían el coste del uso de la infraestructura pública y que este será de alguna manera internalizada por la administración, es razonable pensar que la ventaja en costes ofrecida por la intermodalidad a través de ambas MOs se vea incrementada, aunque considerando la desventaja inicial de las MOs sur en costes, este incremento no parece suficiente para asegurar una intermodalidad más competitiva en costes que la carretera en el transporte entre región centro- sur.

Por otro lado, respecto a las infraestructuras portuarias sólo en el caso de incremento de una grúa en Coronel y Antofagasta tendría impacto en la competitividad de las rutas intermodales articuladas a través de ellos. Sin embargo, la mejora en tiempo, en ningún caso, sería significativa. Por tanto, si bien se concluye que las infraestructuras portuarias son suficientes en el escenario actual, la penalización en tiempo en caso de reducción en la operación de alguna grúa en Coronel y en Antofagasta sería inasumible.

Es interesante destacar que todas las autopistas del mar evaluadas por cada variación del 10% de las tasas portuarias dependientes de las autoridades portuarias se reduce o se incrementa la competitividad de las cadenas intermodales en las MOs norte en 1,75 €/t y viaje y de 1,45€/t y viaje en las MOs sur. A pesar de esto se estima que serían necesarias reducciones tarifarias entre el 30 y el 40% para que las cadenas intermodales generadas por las MOs sur fuesen igual de competitivas en costase que la carretera. En contraposición la

modificación de las tarifas de remolcador y práctico apenas tiene impacto en la competitividad relativa de la intermodalidad.

Han sido muy llamativos los resultados alcanzados con la modificación de la demanda. La demanda global estimada para la intermodalidad a través del puerto *hub* considera que las líneas MOs actuarán como la parte troncal de la cadena que conducirá la importación y exportación del norte y el sur del país hacia el puerto *hub* (el centro). Si bien los análisis llevados a cabo hasta ahora consideraban ratios de ocupación de los buques del 100%, asumiendo que la línea ofreciese capacidad suficiente en ambas direcciones para cubrir la demanda del sentido más exigente sin penalizar en exceso el otro sentido. Sin embargo, el desequilibrio actual de la demanda entre ambos sentidos provoca unas ratios de ocupación media anual en el norte de un 74,2% y en el sur de un 60,3% . Esta ratio de ocupación se ha simulado aproximadamente en la MOs norte, y según los resultados obtenidos, se esperan valores de competitividad en costes algo menos abultados que los obtenidos para el escenario actual (ver escenario 3, ver Tabla 45) pero también cadenas intermodales más rápidas (0,3 horas de media respecto al escenario preliminar). En la MOs sur, la ratio de ocupación actual sería inasumible, es decir, se reduciría la desventaja en costes obtenida en el escenario actual y, aunque se reduciría la desventaja en tiempo, esta sería todavía excesiva (25,6 horas de retraso frente a la carretera que invierte una media de 6 horas en el transporte unimodal).

Por tanto, la viabilidad de la intermodalidad en el sur como alternativa de transporte, al menos en costes, pasaría por garantizar un equilibrio de flujo capaz de al menos presentar tasas de ocupación total del buque del 70%. Para ello debería estudiarse qué tráfico sur-norte que actualmente se transporte por carretera al centro y exterior del país podría contenedorizarse asumiendo penalizaciones de tiempo importantes a cambio de beneficios en costes. Para la intermodalidad en el norte, en caso de no conseguir este equilibrio entre sentidos, pero existiendo un incremento total de la demanda, forzaría a emplear flotas ligeramente más grandes y rápidas pero con el mismo número de buques necesarios, incrementando su desventaja en tiempo. En cualquier escenario de demanda, la intermodalidad en el norte parece que puede ser interesante ya que la penalización en tiempo podría ser asumida (alrededor de 20 horas de retraso frente a la carretera que invertiría 26,5 h) y compensarse con una ventaja significativa en costes en todos los casos (alrededor de 16€/t y viaje) .

Excepto para incrementos de la demanda total (por encima del 3% en la demanda total anual de las MOs norte y de la actual en las MOs sur) en los que se conservase el desequilibrio por sentido, se puede confirmar la estabilidad de la flota propuesta como óptima en el escenario actual, es decir su buen comportamiento en los diferentes escenarios analizados.

## 4.10 Conclusiones

Previsiblemente y según se deduce del capítulo 3, con la ampliación del canal de Panamá, los buques que abastecerán Chile serán de mayor porte por lo que probablemente reduzcan sus escalas en el país. Dada la posibilidad de invertir en el desarrollo de un puerto *hub* en la región central de Chile, este será el destino más probable de los buques de gran calado, dejando al tráfico *feeder* el transporte al resto del país. Consecuentemente y dada la geografía del país, resulta necesario plantearse el transporte puerta a puerta desde este puerto *hub* al resto de regiones del Chile. Así, en este capítulo se han contemplado dos posibles autopistas del mar desde el puerto *hub*: MOs norte y MOs sur. El primer análisis llevado a cabo (escenario preliminar) pretendió evaluar qué puertos en el norte y sur del país cuentan con una situación geográfica más interesante para establecer autopistas del mar con el puerto *hub*, de manera que las rutas intermodales articuladas a través de ellos ofrezcan servicios de transporte competitivos frente a la alternativa por carretera (la unimodal). Paralelamente se optimizó la flota y el servicio de transporte que maximizarían las oportunidades de éxito de la intermodalidad frente a la unimodalidad.

Por tanto, el primer estudio del problema se resolvió con un análisis de *escenarios preliminares*. Es decir, la evaluación de la competitividad de las cadenas intermodales (en tiempo, costes y costes medioambientales) se llevó a cabo asumiendo las mismas condiciones tarifarias y de eficiencia en todos los puertos evaluados. Paralelamente, el análisis evaluó dos disposiciones de cadenas intermodales diferentes: En la etapa I, se consideraba como posible puerto periférico para el establecimiento de autopistas del mar en el sur Puerto Montt, y tres extremos de ruta en tierra para la región norte, tres en la región central y tres en el sur del país; en la etapa II, con dos extremos en el norte, cinco en el centro y dos en el sur no se consideraba Puerto Montt.

Así, los resultados obtenidos en el primer estudio determinaban mejores resultados para la intermodalidad en la estructura de cadenas definida en la etapa II que en la etapa I, y por tanto se asumió como óptima para posteriores análisis la articulación de las cadenas según las redes troncales y capilares definidas en la etapa II. Del análisis de esta etapa se concluía que el puerto de Antofagasta ofrecía las cadenas intermodales con más posibilidades de éxito, en comparación a la unimodalidad para las MOs norte, frente al resto de puertos evaluados en el norte (Arica, Iquique y Angamos). Mientras que para las autopistas del mar del sur, dada la proximidad geográfica de San Vicente y Coronel los resultados en competitividad de sus cadenas no resultaban concluyentes para determinar la prevalencia de uno de los dos puertos. Por el mismo motivo, el análisis de *escenarios preliminares* tampoco fue suficiente para concluir la conveniencia de Valparaíso o San Antonio como posibles puertos *hub* para establecer autopistas del mar con el resto del país. Así, con el objetivo de obtener este conocimiento se abordó un segundo análisis, el análisis de los *escenarios actuales*.

Los *escenarios actuales* han sido caracterizados por los costes tarifarios particulares de cada puerto evaluado, así como por sus medios de carga actuales. De esta manera, este segundo análisis supera la evaluación de rutas y flotas basada en la morfología de las cadenas de transporte (criterios geográficos) para analizar la influencia operativa de los puertos como entes particulares. Los resultados de este segundo análisis han ratificado la elección de los puertos periféricos sugeridos en los *escenarios preliminares* obtenido que los puertos periféricos que articulan las rutas intermodales más competitivas frente a la unimodalidad han sido: Antofagasta en el norte y en el sur San Vicente.

De acuerdo con los resultados alcanzados en los *escenarios actuales*, las rutas intermodales a través de San Antonio han resultado más competitivas en costes que aquellas a través de Valparaíso para las MOs norte mientras que en términos de tiempo, la ventaja era favorable a las rutas articuladas a través de Valparaíso. Lo contrario ocurría con las MOs sur. Ya que las cadenas articuladas a través de las MOs sur no resultan competitivas a través de ningún *hub*, parece razonable que la elección del puerto *hub* se centre fundamentalmente en el comportamiento de las MOs norte articuladas a través de los distintos *hub*. Sin embargo, aún en este caso, la ventaja ofrecida en coste por las MOs norte articuladas a través de San Antonio (0,36€/t y viaje) frente a Valparaíso y la ventaja en tiempo de las cadenas a través de Valparaíso frente a San Antonio (1 hora) no resultan suficientes para sugerir de manera clara uno de los dos puertos como candidato óptimo a *hub*. Tampoco las características de las flotas obtenidas como óptimas para las MOs articuladas a través de cada candidato a hub arrojan diferencias que favorezcan técnicamente la operación con un tipo de flota y por tanto con un determinado puerto. De hecho las flotas obtenidas son prácticamente idénticas.

Es de destacar, además, la estabilidad de las flotas obtenidas como óptimas no sólo para todas las rutas sino también para todos los escenarios evaluados: flotas de tres buques con capacidad de carga cercana a 1300 TEUs con velocidades de 19 kn para las MOs sur y flotas de 4 buques con capacidad de 580 TEUs y 18 kn para las flotas de la MOs norte. Este resultado sugiere una cierta independencia de las flotas óptimas a las características portuarias cuando la modificación de estas es pequeña. Esto quiere decir, que los resultados de flota óptima no variarán mucho ante los distintos escenarios generados por modificaciones moderadas en las condiciones de entorno. Para verificar tal conclusión, el siguiente estudio sensibilizó los últimos resultados obtenidos considerando la modificación de los valores de las variables que habían caracterizado los *escenarios actuales*.

Así, finalmente, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad sobre los resultados alcanzados en caso de que algunos parámetros asociados al *escenario actual* cambien o se modifiquen.

De los resultados del análisis de sensibilidad efectivamente se confirma la estabilidad de las flotas propuestas como óptimas siempre y cuando las demandas totales consideradas en el escenario actual no sobrepasen el 3% de la demanda total actual en las MOs norte y la demanda actual para las MOs sur manteniendo

el desequilibrio actual por sentido. En tal caso habría que considerar la operación de flotas con mayor número de buques siendo estos más grandes y rápidos en las MOs norte y más grandes lentos y mayor número de barcos en la flota para la MOs sur.

Las infraestructuras portuarias actuales parecen suficientes para hacer frente a la operativa de autopista del mar si actúan bajo los parámetros supuestos en este estudio (*escenarios actuales*), si bien una merma del número de grúas en Antofagasta o Coronel penalizaría severamente la competitividad en tiempo de la intermodalidad. Sin embargo se recuerda que la eficiencia portuaria es un concepto más amplio que debe prevalecer para asegurar el interés de la intermodalidad (Suárez-Alemán et al. 2014).

Se espera que debido a la ratio de ocupación de los buques en el escenario actual (desequilibrio de flujo) en las cadenas operadas a través de las MOs propuestas exista una ventaja adicional en tiempo respecto a la prevista en el escenario actual y una ligera desventaja adicional en costes. Sin embargo, para la MOs norte (ratio actual de ocupación en el escenario actual del 74%) la desventaja adicional en costes podría equilibrarse con una reducción de las tasas portuarias del 10% o bien, y de manera más notable, con el cobro de una tasa por uso de infraestructuras y congestión de carretera a los camiones (internalización de los costes reales del transporte de mercancías por carretera; Suárez-Alemán et al. 2015). Adicionalmente a la mejora en competitividad en tiempo de la intermodalidad debido a las ratios de ocupación de los buques por debajo del 100%, se prevé una mejora en tiempo debida a la velocidad media real de los camiones. Esta se estima que sea inferior a la máxima permitida debido a la falta de continuidad real del tráfico por carretera: congestiones, semáforos, etc. En tal caso la MOs norte podría mejorar su competitividad en tiempo de manera significativa llegando a ofertar servicios intermodales con penalización en tiempo de 19 horas respecto a la carretera (26,46 horas de trayecto unimodal) en la MOs a través de Valparaíso y de 20,5 horas a través de San Antonio.

Dado que el interés de la intermodalidad se basa en la posibilidad de ofrecer ventajas claras en tiempo y/o coste (Medda y Trujillo, 2010), con los resultados obtenidos se confirma el interés del establecimiento de la MOs norte con mejoras en costes respecto a la unimodalidad de 12,56€/t y 13,10€/t y viaje (con el desequilibrio de tráfico actual) con Valparaíso y San Antonio respectivamente, valor que se incrementaría en caso de conseguir incrementar el embarque sur-norte sin modificación de los costes de escala actuales ni de internalización de costes externos por el transporte por carretera (CU estable) hasta 12,92€/t y 13,26€/t y viaje con penalizaciones en tiempo de hasta 20,5 horas respecto a la carretera.

En el caso de la MOs sur se considera prioritario el equilibrado del flujo en ambos sentidos. Ya que este provoca que la ratio de ocupación en el escenario actual no supere el 60%, claramente insuficiente para asegurar una ventaja en costes significativa respecto a la unimodalidad. Por otro lado, el retraso en tiempo de la

intermodalidad respecto a la unimodalidad, 23,5 horas (sobre 5.5 horas de transporte para la alternativa unimodal) asumiendo que se alcanzasen ratios de ocupación del 80% y considerando 72 km/h en la velocidad media real del camión, junto con la difícil posibilidad de alcanzar resultados positivos en competitividad relativa en costes (reducciones de las tasas portuarias actuales superiores al 30% o incremento de los costes unitarios de transporte por carretera superiores al 130%) cuestiona seriamente el interés del establecimiento de la MOs sur.

Desde un punto de vista medioambiental, cualquiera de las soluciones de flota sugeridas en el presente estudio operando en las condiciones indicadas ofrecen alternativas de transporte más sostenibles que la alternativa unimodal. Evaluada esta sostenibilidad en términos de costes externos (F3), supondría ahorros en el peor de los casos de 0,71€/t y viaje para las cadenas intermodales norteñas y 0,26€/t y viaje para las sureñas respecto a la unimodalidad.

## **5 Sistema portuario chileno**

### **5.1 Introducción**

En 2014, el 95% del comercio exterior de mercancías de Chile se realizó por vía marítima, cuyo valor FOB<sup>33</sup> fue de 115.465 millones de US\$. A lo largo de sus 6.435 km de línea de costa, Chile cuenta con 24 puertos comerciales de uso público (10 gestionados por empresas estatales y 14 por empresas privadas) y 32 puertos comerciales de uso privado (15 puertos mineros y 17 petroleros).

Estos puertos se han construido, principalmente, en bahías dado que la costa es abierta, desabrigada y cuenta con poca profundidad. Los puertos ubicados en el norte se caracterizan por atender, principalmente, carga de minerales, en los centrales prima el transporte de contenedores y de productos agrícolas y en los puertos del sur se manejan productos derivados de la madera.

### **5.2 Regulación y evolución del Sistema Portuario Chileno**

Hasta hace unas décadas, el sistema portuario de América Latina estaba compuesto por puertos regulados y centralizados (Silva, 2008), siendo el Estado responsable de la construcción, mantenimiento, administración y funcionamiento

---

<sup>33</sup> Valor de una mercancía de exportación cuando está embarcada en la nave, antes de salir hacia su destino.

de estos. Las infraestructuras portuarias presentaban una serie de características que no favorecían el comercio internacional como reducida inversión, elevados aranceles portuarios o baja calidad tanto de los servicios como de instalaciones y el equipo. Según Hoffmann (2000), los puertos de América Latina no solo eran ineficientes y caros, sino que poseían un régimen laboral especial que, en lugar de atender a consideraciones comerciales, fue objeto de cuestiones históricas y del poder sindical. En un principio, a pesar de la puesta en marcha de reformas portuarias, no se incorporaron avances tecnológicos con el objeto de evitar despidos. Por tanto, el régimen laboral portuario no se modificó aun cuando se extendió la contenedorización y se adquirieron grúas. Las primeras reformas portuarias tuvieron lugar en Chile (1981), Colombia y Venezuela (1991), Argentina, México y Uruguay (1992), Brasil (1993) y Panamá (1994).

En Chile la reducida coordinación de los servicios portuarios, la rigidez del marco laboral y las elevadas tarifas obligaron al gobierno a llevar a cabo una reforma en 1981. Esto provocó la eliminación del permiso de estiba especial y el cese de las operaciones en exclusiva de la Empresa Portuaria de Chile (EMPORCHI)<sup>34</sup>. La reforma portuaria de 1981 generó mejoras en la eficiencia de las operaciones y de los servicios portuarios que permitieron absorber el crecimiento de la demanda sin necesidad de grandes inversiones. Sin embargo, a comienzos de la década de los años noventa este modelo se había agotado (Carrillo y Santander, 2005), de manera que el modelo portuario no podía responder a las nuevas exigencias del comercio internacional, por lo que, tuvo que acometerse una segunda reforma. EMPORCHI adquirió la condición de administrador de la infraestructura y se introdujo la iniciativa privada en los servicios portuarios. Posteriormente, la Ley 19.542 de Modernización del Sector Portuario Estatal de 1997, condujo a la desaparición de EMPORCHI, a la creación de 10 empresas estatales autónomas y permitió que los operacodres privados pudieran administrar e invertir en los frentes de atraque. Dos años más tarde se concesionaron las principales terminales del país: Valparaíso, San Antonio y Talcahuano-San Vicente. También se realizó una reforma laboral que permitió ajustar la dotación de personal a las perspectivas comerciales. Las reformas portuarias se tradujeron en un aumento tanto de la productividad como de la competitividad y en una reducción arancelaria.

En la actualidad el sistema portuario chileno está formado por puertos comerciales de uso público y puertos comerciales de uso privado. En la Tabla 46 se especifican los puertos comerciales de uso público que pueden ser gestionados por empresas estatales o por empresas públicas. Este tipo de puertos presta servicios a cualquier usuario que lo solicite (Gobierno de Chile, 2005).

---

<sup>34</sup> Empresa estatal creada en los años 60 y adscrita al Ministerio de Obras Públicas. Sus funciones eran a) explotar y administrar diez puertos comerciales de uso público del Estado; b) actuar como Autoridad Portuaria Nacional; c) realizar, en exclusiva, la estiba y desestiba de la carga, además de su almacenamiento; y d) fijar las tarifas de estos servicios.

**Tabla 46. Puertos comerciales de uso público**

<b>Empresas estatales</b>	<b>Empresas privadas</b>
Empresa Portuaria Arica	Puerto Tocopilla
Empresa Portuaria Iquique	Puerto Mejillones
Empresa Portuaria Antofagasta	Puerto Angamos
Empresa Portuaria Coquimbo	Puerto Caldera
Empresa Portuaria Valparaíso	Puerto Ventanas
Empresa Portuaria San Antonio	Terminal Oxiquím Quintero
Empresa Portuaria Talcahuano-San Vicente	Puerto Lirquén
Empresa Portuaria Puerto Montt	Muelles de Penco
Empresa Portuaria Chacabuco	Muelle CAP
Empresa Portuaria Austral	Terminal Oxiquím Escuadrón
	Muelles Puchoco y Jureles
	Puerto de Coronel
	Puerto de Corral
	Terminal San José de Calbuco

Fuente: Gobierno de Chile (2005)

Los puertos de uso privado ofrecen un servicio exclusivo destinado a responder a las necesidades de la actividad principal de su propietario y se clasifican en 15 puertos mineros y 17 puertos petroleros (Tabla 47).

**Tabla 47. Puertos comerciales de uso privado**

<b>Puertos mineros</b>	<b>Puertos petroleros</b>
Terminal Endesa	Sica Sica
Terminal Collahuasi	Terminal Copec Iquique
Patillos	Terminal Esso Iquique
Caleta Coloso	Terminal Rocas Negras
Terminal Interacid SA	Terminal Petrolero Barquito
Terminal Enaex	Terminal Copec Guayacán
Caleta Ichilla	Terminal Multiboya RPC
Brazo mecanizado SIT Tocopilla	Terminal LPG
Punta Padrones	Terminal Monoboya
Guacolda I, Huasco	Petrox B
Guacolda II, Huasco	Petrox C
Terminal Barquito, Chañaral	Terminal Marítimo Comaco
Terminal CMP Guayacan	Terminal Marítimo Copec
Terminal Punta Chungo, Los Pelambres	Cabo Negro
Terminal Pecket	Laredo
	Gregorio
	Clarencia

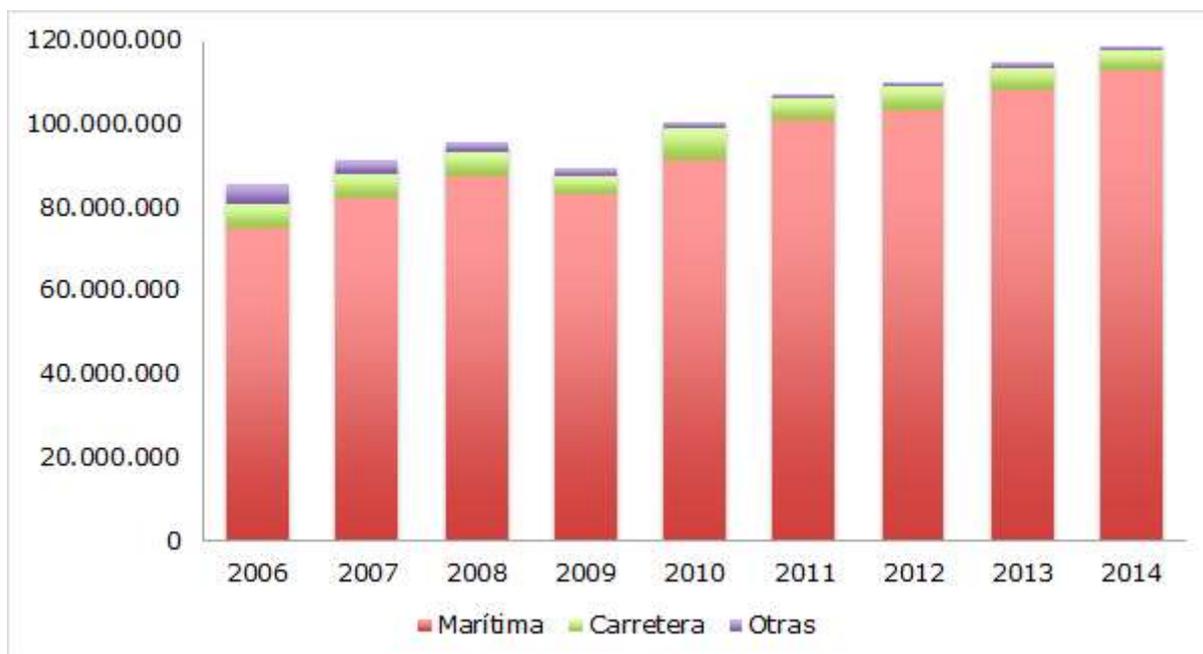
Fuente: Gobierno de Chile (2005)

### **5.3 Evolución del tráfico de mercancías en el sistema portuario chileno (2006-2014)**

En este apartado se ofrece una visión de cómo ha evolucionado el tráfico de mercancía del sistema portuario chileno en su conjunto en el periodo 2006-2014.

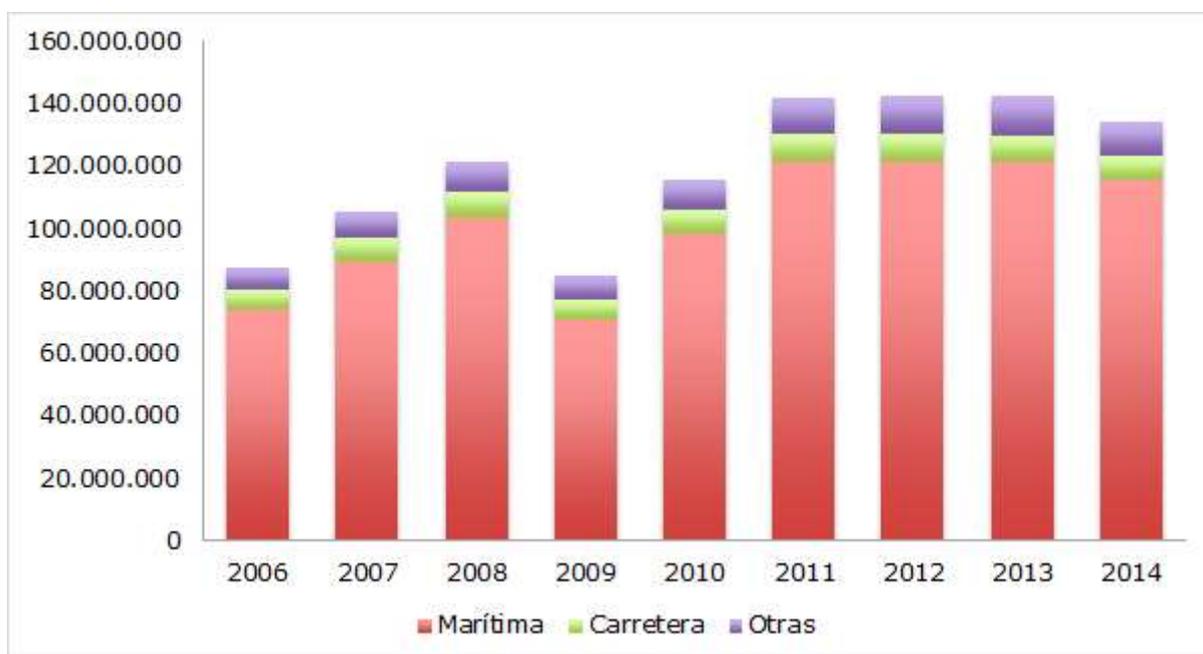
Como se puede observar en la Figura 43 y en la Figura 44, durante el periodo 2006-2014 los puertos chilenos atendieron en torno al 90% del tráfico de comercio exterior que tuvo lugar en Chile, siendo por esta vía por donde se manejaron las mercancías con mayor valor FOB.

**Figura 43. Importaciones e importaciones por tipo de vía (toneladas), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

**Figura 44. Valor FOB de la las importaciones y exportaciones por tipo de vía (miles US\$), 2006-2014**



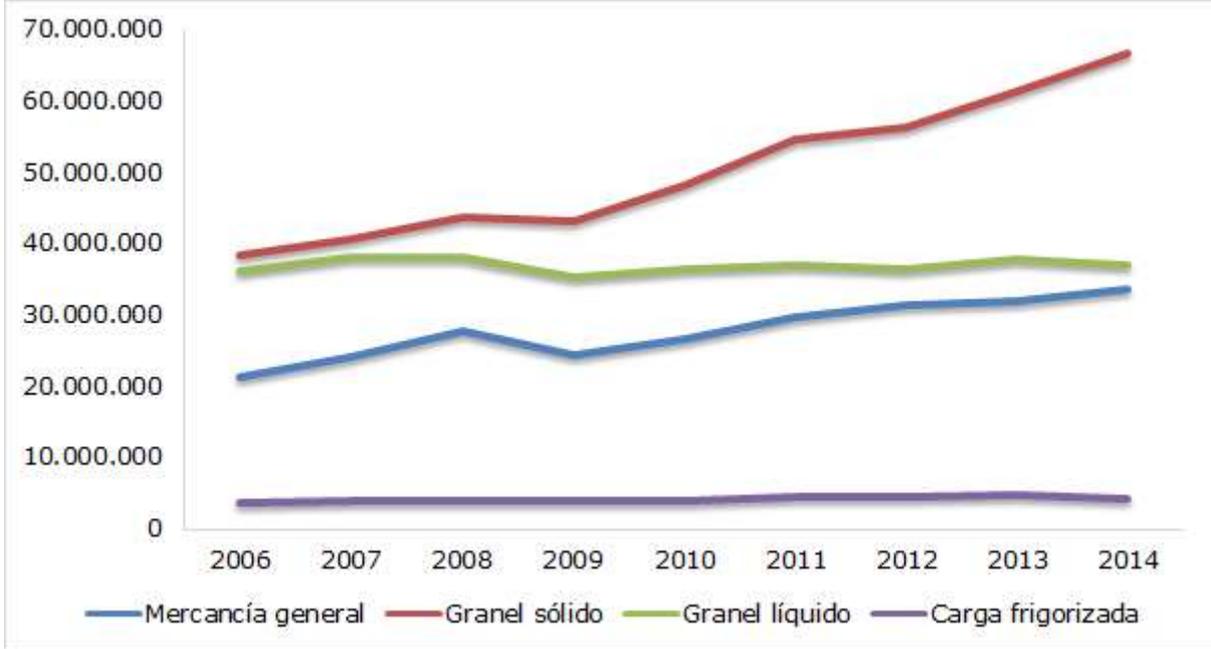
Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Durante este periodo, los puertos chilenos pasaron de manejar 99 millones de toneladas de mercancía en 2006 a mover 142 millones de toneladas, lo que

representa una tasa anual acumulada del 5%. En este periodo los graneles sólidos representaron el 42% de la mercancía total, los graneles líquidos el 31%, la carga general el 23% y la frigorizada el 3% restante (véase Figura 45).

En este periodo y sobre todo en los últimos años destaca el crecimiento del granel sólido que creció a una tasa anual acumulada del 9%, mientras que el resto de cargas crecieron a tasas inferiores (granel líquido al 1% y mercancía general al 3%) o incluso decrecieron, como la carga frigorizada (-1%).

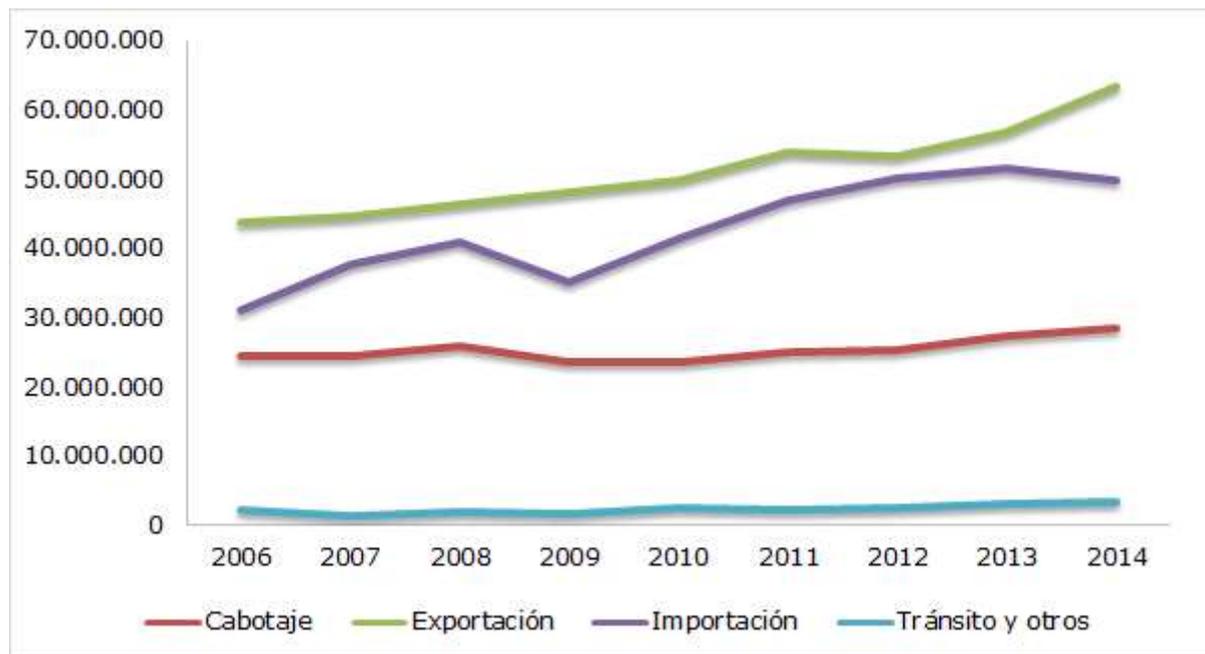
**Figura 45. Mercancías manejadas según tipo (toneladas), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Como se muestra en la Figura 46, la mercancía manipulada en los puertos chilenos se destinó, principalmente, al comercio exterior: el 42% obedece a exportaciones y el 35% a importaciones. El resto se distribuyó en cabotaje (21%) y en tránsito y otros (2%).

**Figura 46. Mercancía manejada según tipo de tráfico (toneladas), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Concretamente, más del 80% del tráfico de cabotaje se compuso de productos químicos y minerales (58% y 28%, respectivamente) (véase Tabla 48). Se trata, entre otros, de ácido sulfúrico, petróleo, carbón, hierro y acero.

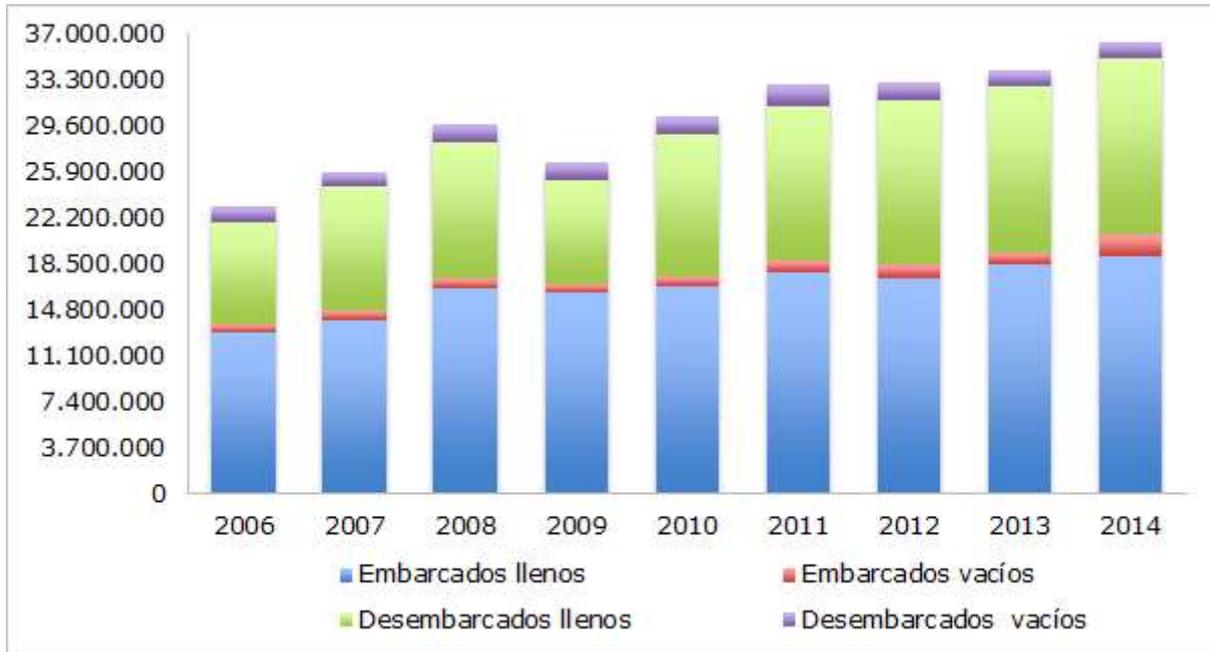
**Tabla 48. Mercancía de cabotaje según tipo (toneladas), 2006-2014**

Año	Químicos	Minerales	Alimenticios	De transporte	Agropecuarios	Industriales	Otros
2006	7.284.015	3.573.948	235.088	82.088	93.811	7.063	906.772
2007	7.675.311	3.082.051	927.269	109.611	1.285	49.382	533.214
2008	7.351.716	3.734.947	570.438	388.577	19.072	70.534	864.066
2009	7.150.815	3.199.752	231.916	38.585	33.914	59.550	1.075.396
2010	7.268.104	2.967.132	253.378	30.522	63.927	90.234	1.133.262
2011	6.740.603	3.754.887	467.408	54.231	35.278	137.931	1.355.748
2012	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2013	7.442.370	4.037.526	360.736	119.078	0	125.977	1.627.250
2014	7.454.696	4.155.143	607.334	161.688	910	227.597	1.602.640

Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Entre la mercancía que se manipula en estos puertos, destaca la mercancía contenedorizada. En promedio y durante el periodo 2006-2014, mientras el 55% de los contenedores manejados fueron embarcados llenos, el 33% correspondió a contenedores desembarcados llenos (ver Figura 47). La tasa de crecimiento anual acumulado fue positiva para cada tipo, destacando en primer lugar los contenedores embarcados vacíos seguidos de los desembarcados llenos, embarcados llenos y desembarcados vacíos (13%, 7%, 5% y 2%, respectivamente).

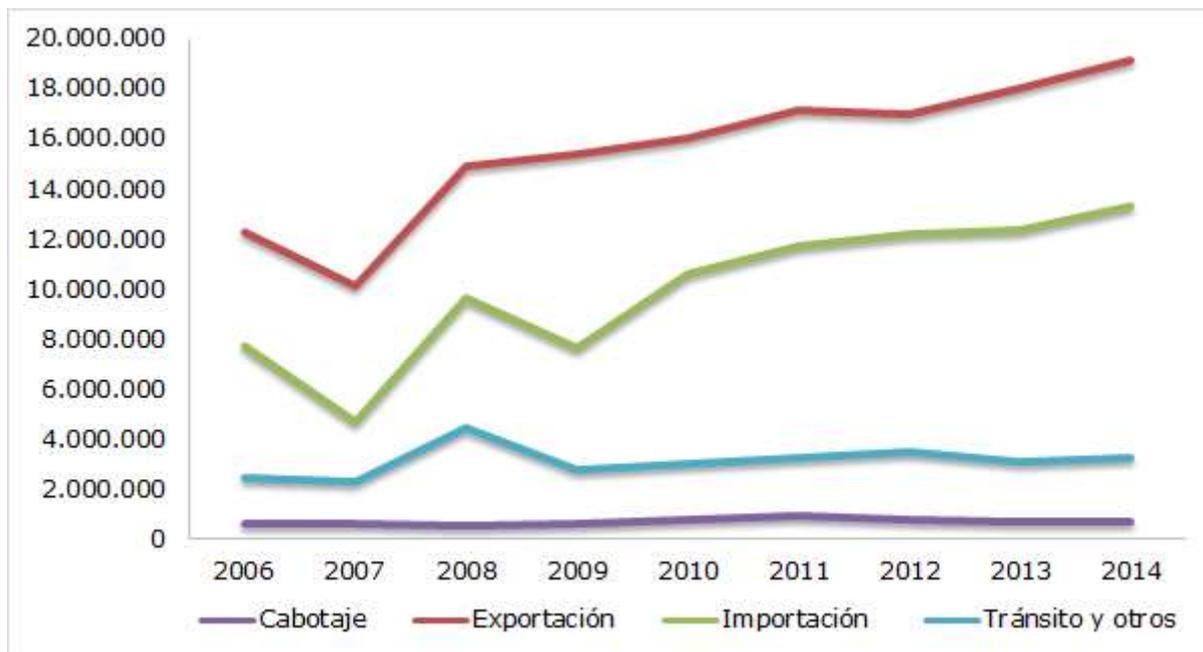
**Figura 47. Contenedores manejados según tipo (toneladas), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Como muestra la Figura 48, estos contenedores se destinaron principalmente al comercio (53% a exportaciones y 34% a importaciones), quedando en último lugar el cabotaje (2%).

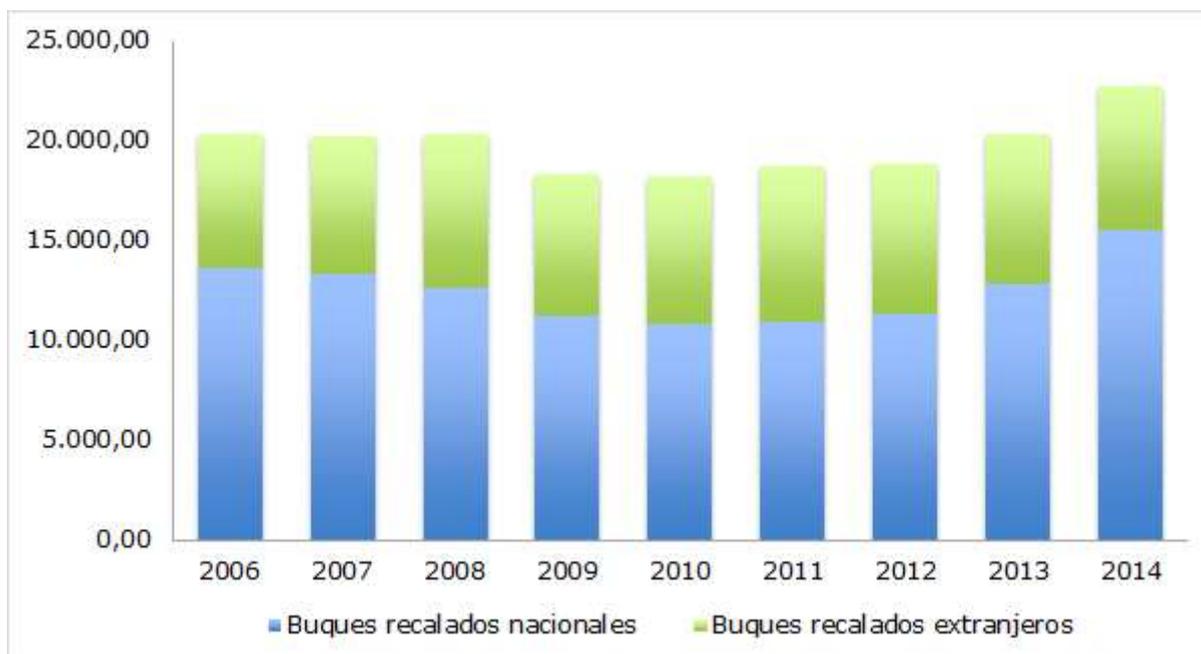
**Figura 48. Contenedores manejados según tipo de tráfico (toneladas), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Como se muestra en la Figura 49, en Chile se atendieron 178.044 buques, siendo el 63% buques nacionales. El número de buques recalados aumentó a lo largo del periodo, concretamente, los buques nacionales presentaron una tasa de crecimiento anual acumulado del 2% y los internacionales del 1%.

**Figura 49. Buques recalados en los puertos chilenos según tipo (número), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

## **5.4 Puertos comerciales de uso público: Empresas estatales**

Como se vio en la Tabla 46, el sistema portuario comercial de uso público está gestionado por 10 empresas estatales y 14 empresas privadas. Por su gran repercusión en el tráfico del conjunto del sistema portuario chileno en este caso se describe el sistema portuario estatal chileno (SPEC).

Estas empresas se crearon con la finalidad de promover la competencia en el sector, descentralizar la Empresa Portuaria de Chile y abrir los puertos estatales al sector privado.

Son empresas del Estado que tienen patrimonio propio y duración indefinida. Su relación con el Gobierno de Chile se realiza a través del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones y el control de su gestión lo ejerce el Sistema de Empresas Públicas (SEP).

Las empresas portuarias estatales son responsables de la administración, explotación, desarrollo y conservación de los puertos y de las terminales y pueden ejecutar obras de construcción ampliación, mejoramiento, conservación, reparación y dragado de los puertos y terminales. Las empresas pueden realizar su objeto directamente o a través de terceros mediante concesiones portuarias para los casos de frente de atraques.

El Sistema Portuario Estatal ha pasado de mover un total de 32 millones de toneladas de mercancía en 2006 a 43 toneladas en 2014, lo que representa un crecimiento anual acumulado próximo al 4%. La carga contenedorizada es la que mayor crecimiento registró (5%), seguida de los graneles (2%); por el contrario, a mercancía fraccionada experimentó una tendencia negativa (-1%). En 2014, el 68% del tráfico total correspondió a carga contenedorizada, el 20 a graneles y el 12% a carga fraccionada.

A continuación, se ofrece una descripción de las empresas portuarias estatales.

### **Empresa Portuaria Arica**

El Puerto de Arica, está ubicado en la XV Región de Arica y Parinacota, Provincia de Arica, Comuna y Ciudad del mismo nombre al norte de Chile. La Empresa Portuaria Arica inició sus actividades el 30 de abril de 1998.

La empresa posee 2 frentes de atraque incluyendo el sitio al servicio del Perú<sup>35</sup>. De acuerdo con el propósito de promover la participación privada instaurado en la Ley N° 19.542, el 1 de octubre de 2004 se inició la Concesión del Frente de Atraque N° 1 del Puerto de Arica por 30 años al Consorcio denominado Terminal Puerto Arica S.A.,<sup>36</sup> cuyo objetivo es la explotación de las actividades portuarias mejorando la competitividad del Puerto de Arica. Por tanto, desde ese año, es la única empresa que se encuentra completamente concesionada, siendo un puerto monooperado, lo que se traduce en que la misma empresa ofrece todos los servicios portuarios.

### **Empresa Portuaria Iquique**

El Puerto de Iquique cuenta con dos terminales de atraque. El terminal N°1 Molo está administrado por la Empresa Portuaria Iquique (EPI) y se utiliza para la descarga de mercaderías, granel, contenedores y automóviles. Este terminal opera bajo un sistema denominado multioperado, en el cual distintas empresas privadas de muellaje ofrecen los servicios de transferencia en un mismo frente de atraque. Además, EPI ofrece una serie de servicios asociados, como almacenamiento e incluso alojamiento de servidores corporativos. En este terminal prestan sus servicios 9 agencias navieras, 8 empresas de muellaje y 18 empresas de transporte nacional e internacional.

En el año 2002, el terminal N°2 Espigón se concesionó por un periodo de 20 años a la empresa Iquique Terminal Internacional (ITI). Al comprometerse esta empresa a acometer nuevas inversiones, en el año 2008 el periodo de concesión se amplió en otros 10 años. Este terminal opera bajo un sistema monooperador.

---

<sup>35</sup> En concordancia con el Acta de Ejecución del Tratado de 1929, desde el año 1999 Perú, a través de ENAPU, ejerce la administración del malecón (Sitio 7) de propiedad de Empresa Portuaria Arica en lo relativo a cargas que tengan como destino el territorio peruano o provengan de él.

<sup>36</sup> El Consorcio está formado por Inversiones Cosmos Ltda., Empresas Navieras S.A., Ransa Comercial S.A. y Sudamericana Agencias Aéreas y Marítimas S.A.

## **Empresa Portuaria Antofagasta**

El Puerto Antofagasta, consta de dos terminales con seis sitios de atraque efectivos. El Terminal 1, que comprende los sitios 1, 2 y 3, es administrado directamente por la Empresa Portuaria Antofagasta (EPA), bajo un sistema multioperado. En él operan todas las agencias navieras, de muellaje y aduanales que lo deseen.

El Terminal 2 es administrado y explotado por Antofagasta Terminal Internacional S.A (ATI), en régimen monooperado. Esta empresa obtuvo la licitación de los sitios 4-5 actualmente consolidados en un solo sitio de atraque ampliado, el sitio 6 -de escaso uso portuario- y el sitio 7. La concesión se estableció con fecha 1 de marzo de 2003 por 20 años, periodo que aumentó en 10 años debido a las inversiones de ampliación del sitio 7 que incluyó el incremento de equipos e instalaciones con el fin de aumentar su eficiencia operativa. Este Terminal 2 concentra más del 95% del movimiento de carga de Puerto Antofagasta.

## **Empresa Portuaria Coquimbo**

La empresa posee un terminal con dos sitios, operado por la empresa portuaria en un sistema multioperado. Está especializada en la exportación de fruta y en la atención de cruceros.

Hasta marzo de 2012, Empresa Portuaria Coquimbo proporcionó la totalidad de los servicios portuarios que históricamente había suministrado a sus clientes, tales como uso de muelle a la nave y a la carga, almacenamiento y acopio, así como alquiler de equipos, suministro de insumos básicos, permanencia de embarcaciones menores, etc.

El 9 de marzo de 2012, Empresa Portuaria Coquimbo firmó un contrato de concesión con Terminal Portuario Coquimbo (TPC), empresa que a partir del 1 de abril de 2012 comenzó a operar dicho frente de atraque por los siguientes 20 años, comprometiendo asimismo un programa de inversiones para la construcción de un tercer sitio de atraque (embarques de graneles) y de un terminal de pasajeros. A partir de esa fecha TPC se hace cargo de la explotación comercial del frente de atraque con que cuenta la empresa.

## **Empresa Portuaria Valparaíso**

El Puerto de Valparaíso está administrado por la Empresa Portuaria Valparaíso (EPV). Esta empresa mantiene vigente 5 contratos de concesión con compañías del país para potenciar la competitividad del puerto, conforme a la logística, seguridad y tecnología, todo ello en sintonía con el desarrollo sustentable de la ciudad. A finales de 1999 se resolvió la licitación del terminal N° 1, compuesto por 5 sitios donde se concentra cerca del 88% del movimiento de carga. El resto de la carga se moviliza a través del terminal N° 2, formada por dos sitios. El puerto cuenta con una terminal de pasajeros y una zona de apoyo logístico donde se coordina la entrada y salida de los camiones y cargas desde y hacia los terminales de Puerto Valparaíso. Además, existen zonas de uso comercial y turístico y paseos públicos. En la Tabla 49 se muestran detalles de los cinco contratos de concesión.

**Tabla 49. Contratos de concesión de la empresa portuaria de Valparaíso**

	<b>Terminal 1</b>	<b>Terminal 2</b>	<b>ZEAL<sup>1</sup></b>	<b>Terminal de pasajeros</b>	<b>Puerto Barón</b>
Descripción	Carga	Carga	Plataforma de control logístico	Pasajeros	Centro comercial y turístico
Tipo de naves	Full container, refrigerados, multipropósito	Full container, refrigerados, multipropósito		Cruceros	
Operación	Monooperado	Monooperado			
Administración	Concesión	Concesión	Concesión	Concesión	Concesión
Concesionario	Terminal Pacífico Sur Valparaíso S.A. (TPS)	Terminal Cerros de Valparaíso (TCVAL)	ZEAL Sociedad Concesionario S.A. (ZSC)	Valparaíso Terminal de Pasajeros S.A. (VTP)	Plaza Valparaíso S.A. (PVSA)
Fecha de adjudicación	Agosto 1999	Abril 2013	Diciembre 2007	Septiembre 2002	Octubre 2006
Plazo concesión	20 años con opción a 30 años	30 años	30 años	30 años	
Inicio operaciones	1 enero 2000	16 diciembre 2013	Mayo 2008	Diciembre 2002	

<sup>1</sup>Zona de Extensión y Apoyo Logístico

Fuente: Elaboración propia. Cámara Marítima y Portuaria de Chile

### **Empresa Portuaria San Antonio**

Puerto San Antonio, que está situado en la V región de Chile, provincia de San Antonio, está administrado por la Empresa Puerto San Antonio S.A. (EPSA). Es el puerto más próximo a la ciudad de Santiago (100 km).

Puerto San Antonio es un puerto de carácter multipropósito en el que se produce la transferencia de graneles líquidos y sólidos, contenedores y carga fraccionada.

Este puerto cuenta con 9 sitios de atraque agrupados en cuatro terminales portuarios. El principal terminal corresponde a la concesión entregada a San Antonio Terminal Internacional (STI), especializado en contenedores, bajo la modalidad monooperador. Puerto Central (PCE) es la empresa a la que se adjudicó la concesión del frente de atraque Costanera-Espigón del Puerto de San Antonio, bajo la modalidad de monooperador. El terminal granelero norte se encuentra concesionado a la empresa Puerto Panul S.A. bajo el sistema monooperador. Por último, el terminal N°9, operado bajo un sistema multioperado y administrado por la Empresa Portuaria San Antonio, está especializado en la transferencia de graneles líquidos. En la Tabla 50 se muestran detalles de la administración de los terminales del Puerto San Antonio.

**Tabla 50. Contratos de concesión de la empresa portuaria de San Antonio**

	<b>Terminal STI</b>	<b>Terminal PCE</b>	<b>Puerto Panul</b>	<b>Sitio 9</b>
Descripción	Carga	Carga	Granel sólido	Granel líquido
Tipo de naves	Todo tipo	Multipropósito	Bulk carrier	Granel líquido
Operación	Monooperado	Monooperado	Monooperado	Multioperado
Administración	Concesión	Concesión	Concesión	Empresa Portuaria San Antonio
Concesionario	San Antonio Terminal Internacional SA (STI SA)	Puerto Central SA	Puerto Panul SA	
Fecha de adjudicación	Enero 2000	Mayo 2011	Octubre 1999	
Plazo concesión	20 años	20 años	30 años	
Inicio operaciones	(*)	Noviembre 2011	Enero 2000	

(\*) Se ha solicitado información a la empresa. Hasta la fecha no se ha obtenido respuesta

Fuente: Elaboración propia. Empresa Portuaria de San Antonio y terminales privadas

### **Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente**

La Empresa Portuaria Talcahuano San Vicente tiene bajo su administración los puertos de Talcahuano y San Vicente, en la VIII región de Chile, a 500 kilómetros al sur de Santiago de Chile. Ambos puertos, que tienen carácter multipropósito, distan entre sí 2 kilómetros. Predominan en estos puertos las transferencias de productos forestales y pesqueros, así como los industriales y los comestibles. Se trata de puertos que han apostado por el desarrollo de la transferencia en contenedores, aunque sin dejar de lado el movimiento de cargas parceladas y a granel.

El Puerto de Talcahuano cuenta con un sitio para naves comerciales y otro para naves pesqueras menores en los que se produce fundamentalmente la transferencia de contenedores, seguida de carga fraccionada, destacando en esta última los productos derivados de la actividad forestal. También se realizan descargas de pesca para el consumo humano. En cuanto al tipo de carga, predomina la transferencia de productos comestibles e industriales.

En enero de 2012 se inició formalmente la operación de la concesión de la parte comercial del puerto por parte de Talcahuano Terminal Portuario S.A. (TTP), empresa del Grupo Empresas Navieras S.A., a quienes se adjudicó la operación del puerto por 30 años. El resto de las instalaciones portuarias corresponde a diversas instalaciones pesqueras.

Puerto San Vicente opera en régimen de monooperación, ya fue entregado en concesión a la empresa San Vicente Terminal Internacional S.A. (SVTI),<sup>37</sup> que comenzó sus operaciones el 1 de enero del año 2000. Este puerto transfiere principalmente productos contenedorizados, entre los que destacan celulosa, maderas, sal, comestibles y productos industriales.

### **Empresa Portuaria Puerto Montt**

Puerto Montt se sitúa en la X región de Chile y está administrado por la Empresa Portuaria Puerto Montt. El puerto cuenta con un terminal comercial, que posee dos sitios y está operado por la empresa portuaria. También posee un terminal de transbordadores e instalaciones necesarias para la atención de cruceros. El terminal de transbordadores cuenta con 5 rampas diseñadas para operar a diferentes niveles de mareas.

La Empresa Portuaria Puerto Montt transfiere carga general fraccionada y graneles, siendo los fertilizantes su principal producto de transferencia.

### **Empresa Portuaria Chacabuco**

La Empresa Portuaria de Chacabuco administra el Puerto de Chacabuco, que se encuentra en la XI región de Chile. La empresa posee dos frentes de atraque, un muelle flotante y un terminal de transbordadores, todos los cuales están bajo la administración de la empresa portuaria siguiendo un esquema multioperado. La principal carga transferida es la pesca y está especializado en la industria del salmón.

El Puerto Chacabuco se encuentra operativamente dividido en dos zonas: una zona consistente en muelles convencionales multipropósito y otra destinada al terminal de transbordadores.

En los muelles convencionales multipropósito se atienden diferentes tipos de naves: graneleras, portacontenedores refrigerados, portacontenedores y pesqueros industriales. En esta zona existen 3 muelles con 5 sitios de atraque en total. En el muelle N° 1 se da servicio a naves comerciales del tipo metaleras, refrigeradas, portacontenedores, turísticas y naves pesqueras. Este muelle representa el sitio comercial de mayor relevancia del puerto. El muelle N° 2 le sigue en importancia comercial y se utiliza principalmente para naves pesqueras, también para naves de pasajeros y eventualmente para portacontenedores. Finalmente, en la zona de muelles se encuentra un muelle flotante, que consiste en un cajón de hormigón flotante que genera 2 frentes de 24 metros cada uno y un frente de 12 metros, y es utilizado por embarcaciones turísticas, pesqueros menores y lanchas de bahía, entre otros.

---

<sup>37</sup> Consorcio formado por Sudamericana Agencias Aéreas y Marítimas (SAAM) y SSA Holdings International

El terminal de transbordadores cuenta con 5 rampas de atraque a diferentes niveles, utilizadas por los transbordadores según sea el nivel de marea del momento.

### **Empresa Portuaria Austral**

Puerto Austral se ubica en la XII región, en el extremo sur de Chile y está administrado por la Empresa Portuaria Austral.

La Empresa Portuaria Austral administra tres terminales, de los cuales dos se encuentran en la ciudad de Punta Arenas y el tercero en Puerto Natales. Las principales cargas transferidas corresponden a fruta, verduras, material de construcción, carga congelada y abastecimiento del comercio local.

El terminal Arturo Prat se encuentra en el centro de la ciudad de Punta Arenas y está especializado en la recepción y atención de cruceros de turismo (para los que cuenta con una sala de pasajeros), portacontenedores refrigerados, naves científicas y actividades complementarias. El terminal José de los Santos Mardones se ubica en el sector de Bahía Catalina, al norte de Punta Arenas. En este terminal se cargan y descargan las mercancías que llegan a la región y de difícil transporte por el centro de la ciudad. Además, se realizan actividades de almacenaje y otros servicios, constituyendo el recinto portuario más extenso de los que posee la Empresa Portuaria Austral. El terminal de transbordadores de Puerto Natales se sitúa en la costa oriental del seno de Última Esperanza y presta servicio a buques tipo *roll-on roll-off*, buques comerciales y cruceros turísticos livianos que arriban a la ciudad, para lo que dispone de una sala de pasajeros, y también sirve de resguardo a las embarcaciones pesqueras que se abrigan en sus sitios interiores.

## **5.5 Tráfico de mercancías y factores productivos de los puertos comerciales de uso público: Empresas estatales y otras**

En este apartado se describe el tráfico de mercancías y la dotación de factores productivos de todos los puertos comerciales de uso público gestionados por empresas públicas, así como del Puerto Mejillones y Puerto Coronel (gestionados por empresas privadas). Estos últimos, junto a los principales puertos estatales, son los puertos usados en el modelo de identificación de Autopistas del mar competitivas en Chile y sus flotas óptimas. La distribución de estos puertos a lo largo del litoral chileno se muestra en la Figura 50.

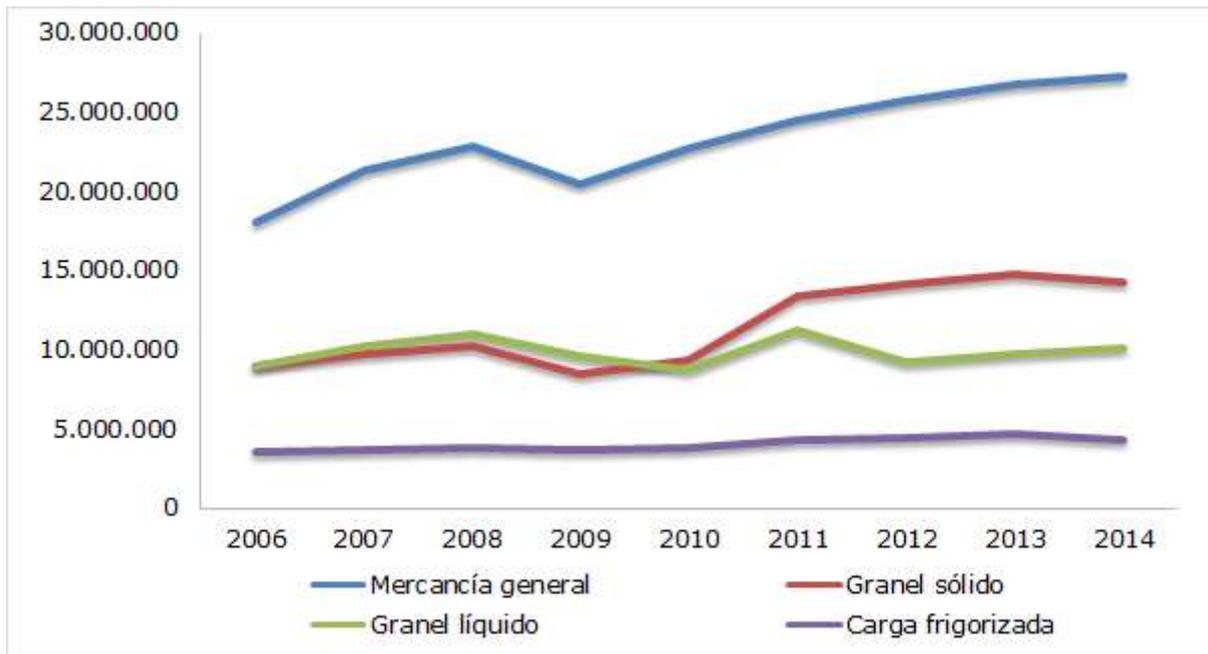
**Figura 50. Puertos seleccionados**



### **5.5.1 Evolución del tráfico de mercancías (2006-2014)**

Durante el periodo 2006-2014, los puertos mencionados movieron un total de 438 millones de toneladas de mercancía, de las cuales el 48% correspondió a mercancía general, 24% a granel sólido, 20% a granel líquido y 8% a mercancía frigorizada. Como se puede observar en la Figura 51, en conjunto, el tráfico total experimentó un crecimiento anual acumulado del 4%, destacando el granel sólido (6%) seguido de la mercancía general (5%), la carga frigorizada (2%) y el granel líquido (1%).

**Figura 51. Evolución del tráfico de mercancías (toneladas), 2006-2014**



\*Datos de Puerto Angamos disponibles para el periodo 2011-2014

Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

Esta presencia tan acentuada de mercancía general se puede observar desagregada por puerto en la Figura 52. No obstante, Coquimbo y Mejillones se caracterizaron por manejar principalmente graneles. Concretamente, Coquimbo recibe cemento, minerales, maíz y trigo; y Puerto Mejillones maneja ácido sulfúrico, carbón, coque de petróleo, caliza, clinker, zinc, plomo y azufre.

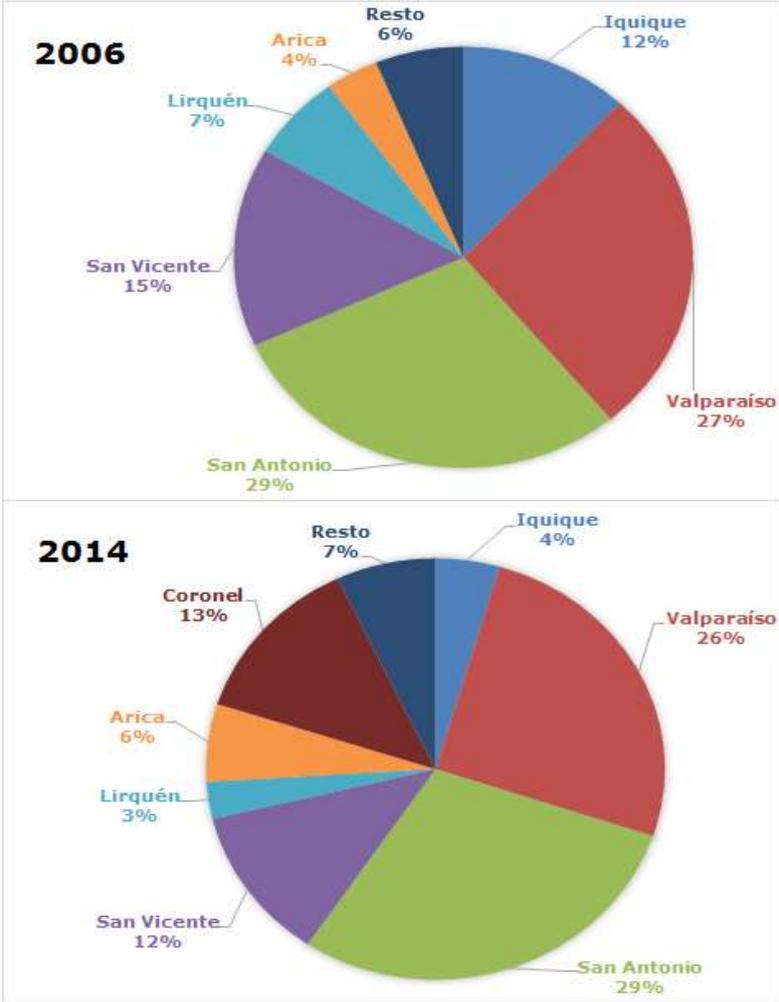
**Figura 52. Mercancía por puerto y tipo (toneladas), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007-2015)

En la Figura 53 se puede observar la proporción de contenedores que movió cada puerto con respecto al total de contenedores manejados en estos puertos, durante los años 2006 y 2014. Valparaíso, San Antonio y San Vicente movieron conjuntamente la mayor parte de la mercancía en contenedores (71% en 2006 y 67% en 2014). No obstante, Coronel pasó de manejar un porcentaje muy poco significativo (0,1%) en 2006, a mover el 13% de los contenedores registrados en estos puertos.

**Figura 53. Contenedores manejados por puerto, 2006 y 2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007,2015)

Del tráfico total de contenedores manejados por estos puertos, en 2006, el 57% se debió a exportaciones y el 36% a importaciones (Tabla 51). En 2014, mientras que las importaciones apenas aumentaron (0,3%), las exportaciones se decrecieron en 4 puntos porcentuales, lo que supone una tasa de crecimiento anual acumulada del -1% en el periodo. En 2006, Valparaíso y San Antonio fueron los principales puertos dedicados al comercio. Juntos manejaron en torno al 53% de la carga contenedorizada exportada y el 66% de la importada. Destacaron, San

Vicente en la exportación de contenedores (22%), seguido de Lirquén (9%), e Iquique en la importación (24%). En 2014, Valparaíso y San Antonio mantuvieron su hegemonía como puertos importadores y exportadores. Coronel e Iquique son los puertos que ha experimentado mayor cambio en el periodo. El primero pasó de exportar un 0,2% a un 20% y el segundo pasó a manejar tan solo el 7% de la carga de importación contenedorizada, perdiendo 17 puntos.

**Tabla 51. Exportaciones e importaciones de contenedores sobre el tráfico total por puerto (%), 2006 y 2014**

Puerto	Exportación		Importación	
	2006	2014	2006	2014
Arica	1,20	1,63	0,56	0,48
Iquique	6,62	3,20	23,74	6,84
Angamos	3,48	2,37	0,82	3,78
Antofagasta	3,30	4,84	2,37	2,35
Coquimbo	0,09	0,11	0,03	0,16
Valparaíso	27,42	25,07	30,68	33,28
San Antonio	25,26	21,86	35,43	40,92
San Vicente	21,93	16,24	3,31	3,51
Lirquén	9,48	4,52	2,80	1,26
Coronel	0,18	19,72	0,01	7,01
Chacabuco	0,60	0,22	0,01	0,01
Austral	0,43	0,23	0,24	0,38
<b>Total</b>	<b>56,93</b>	<b>52,71</b>	<b>35,81</b>	<b>36,67</b>

Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007, 2015)

Estos resultados muestran evidencias de una posible especialización portuaria, basada en la distribución del tráfico. Así, para cuantificarla se estableció un índice (ver Tabla 52), que mide -por puerto y año- el porcentaje de cada tipo de mercancía movido (mercancía general y frigorizada frente a graneles) sobre el tráfico total atendido. Los puertos que presentaron una manifiesta especialización hacia la mercancía general y frigorizada fueron Valparaíso, Angamos, Iquique, Lirquén, Chacabuco, San Vicente, Arica, Antofagasta y San Antonio. En 2014, más del 67% del tráfico manejado en estos puertos correspondió a mercancía general y frigorizada, destacando los tres primeros por estar cercanos al 100% en el movimiento este tipo de carga. Puerto Mejillones y Puerto Montt, por el contrario, mostraron una especialización en graneles 100% y 70% en 2014.

**Tabla 52. Distribución del tráfico por tipo de mercancía (%), 2006-2014**

Puerto	Media (2006-2014)		2014	
	General <sup>a</sup>	Graneles	General <sup>a</sup>	Graneles
Arica	75	25	77	23
Iquique	94	6	99	1
Angamos	98	2	97	3
Mejillones	19	81	0	100
Antofagasta	71	29	67	33
Coquimbo	58	42	32	68
Valparaíso	100	0	100	0
San Antonio	67	33	71	29
San Vicente	84	16	84	16
Lirquén	90	10	88	12
Coronel	44	56	52	48
Puerto Montt	50	50	30	70
Chacabuco	89	11	83	17
Austral	100	0	100	0

\*Datos de Puerto Angamos disponibles para el periodo 2011-2014

<sup>a</sup>Incluye carga frigorizada

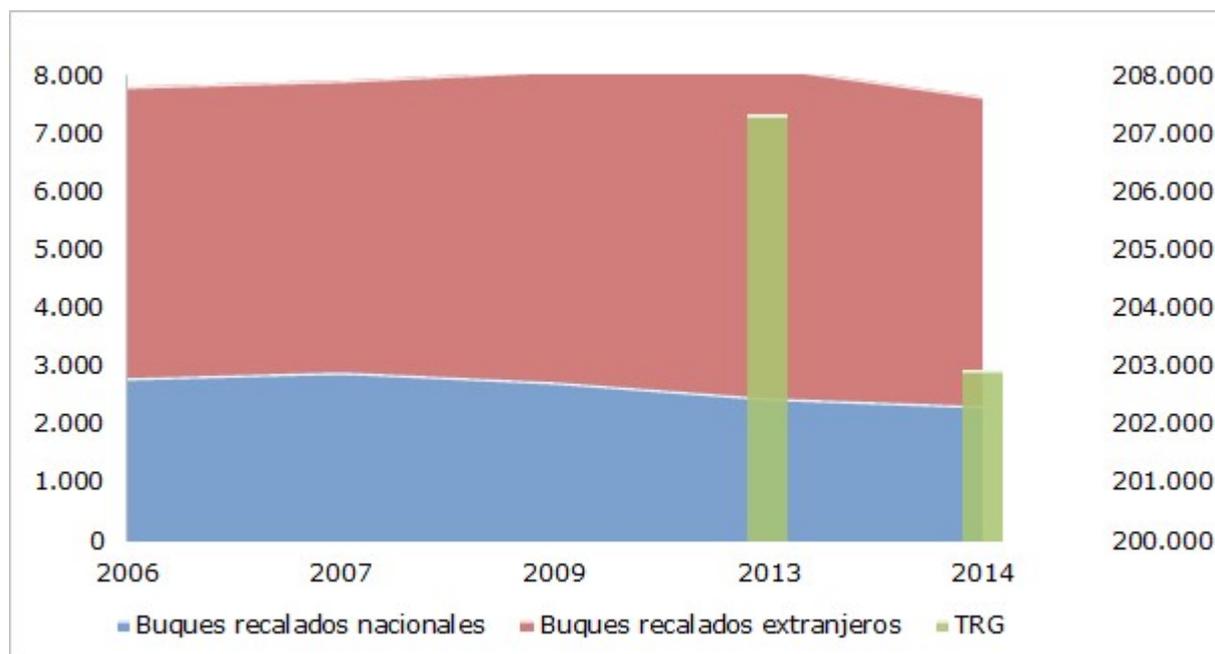
Fuente: Elaboración propia. Ministerio de Transporte-Telecomunicaciones de Chile y DIRECTEMAR (2007-2015)

La Figura 54 muestra el total de buques recalados en los puertos de estudio<sup>38</sup>, diferenciando entre buques nacionales y buques extranjeros. Como se puede observar, mientras que en 2006 se atenderon 7.817 buques, de los cuales el 64% eran extranjeros, en 2014 recalaron en Chile 7.651 buques (70% extranjeros). En 2014 llegaron a los puertos chilenos 491 buques menos que en 2013. A pesar de que esto supuso una tasa de crecimiento anual acumulado de -6%, las toneladas de registro bruto (TRG) de los buques atendidos tan sólo se redujeron en un 2%. Esto podría deberse a la reducción de la flota y el aumento del tamaño de los buques. Desde los años 70, la preocupación por el aprovechamiento de las economías de escala ha traído consigo la construcción de buques de mayor tamaño. Concretamente, el aumento del tráfico de contenedores, gracias a su fácil manipulación, ha incentivado que las grandes líneas transoceánicas empleen buques mayores con el fin de reducir costes.

Los puertos que mayor número de buques atendieron en 2014 fueron Valparaíso (1.200 buques) y San Antonio (1.157 buques), que representan conjuntamente el 31% de los buques atendidos, y Austral (1.114 buques, principalmente transbordadores).

<sup>38</sup> Datos de Puerto Angamos no disponibles.

**Figura 54. Evolución buques recalados (número) y TRG (miles de toneladas), 2006-2014**

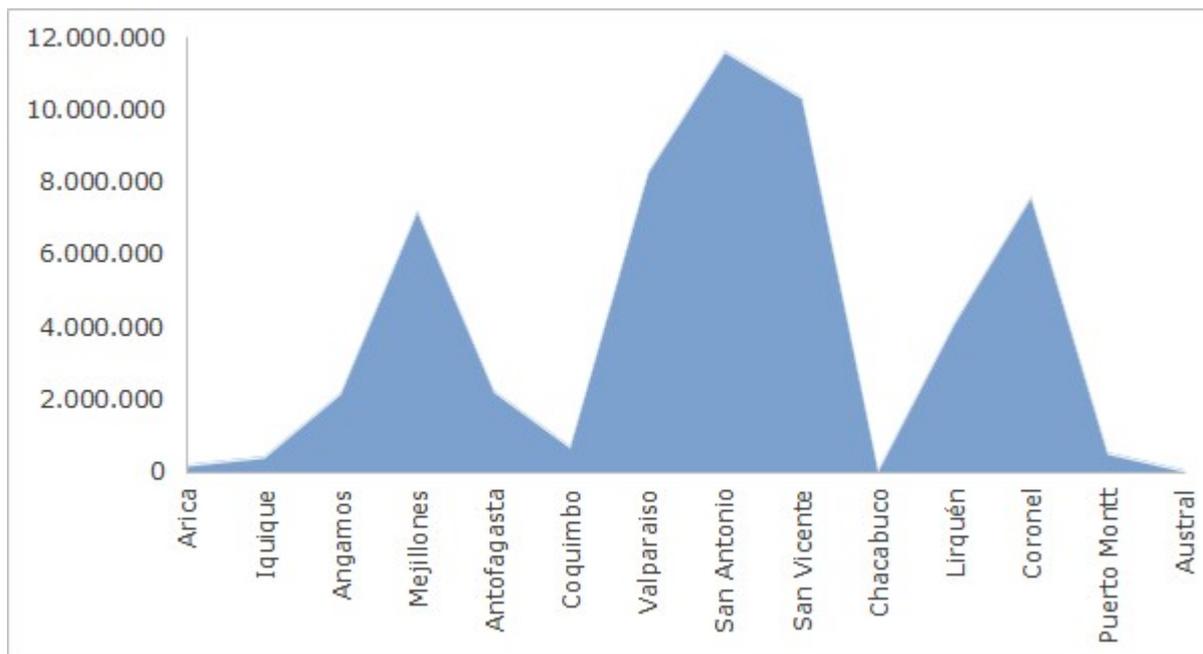


Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007, 2008, 2010, 2014, 2015)

### 5.5.2 Tráfico de mercancías y factores productivos en la actualidad (2014)

En la actualidad, los puertos que más tráfico recibieron fueron San Antonio (11.637.480 t), San Vicente (10.387.939 t) y Valparaíso (8.347.510 t), Coronel (7.640.859 t) y Mejillones (7.257.440 t), representando el 91% de la carga manejada por los puertos estudiados (Figura 55). A estos puertos les siguieron Lirquén (4.147.331 t), Antofagasta (2.251.054 t), Angamos (2.235.271 t); y a una mayor distancia Coquimbo (737.923 t), Puerto Montt (558.732 t), Iquique (424.678 t), Arica (199.274 t), Chacabuco (71.098 t) y Austral (41.774 t).

**Figura 55. Tráfico manejado por empresa portuaria (toneladas), 2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2015)

Como se puede observar en la Tabla 53, el 69% de los muelles son polivalentes, el 16% está dedicado a contenedores, el 12% a graneles y el 3% a autotransbordo. Los puertos que poseen un mayor número de puestos de atraque son Austral y San Antonio con 9 puestos, y Valparaíso con 8 puestos. Mientras Puerto Austral solo cuenta con muelles multipropósito, tanto San Antonio como Valparaíso disponen de 3 muelles dedicados a contenedores. Además, San Antonio, Mejillones y Coronel son los únicos puertos con muelles dedicados al tráfico de graneles.

**Tabla 53. Puestos de atraques por tipología y por puerto (número), 2014**

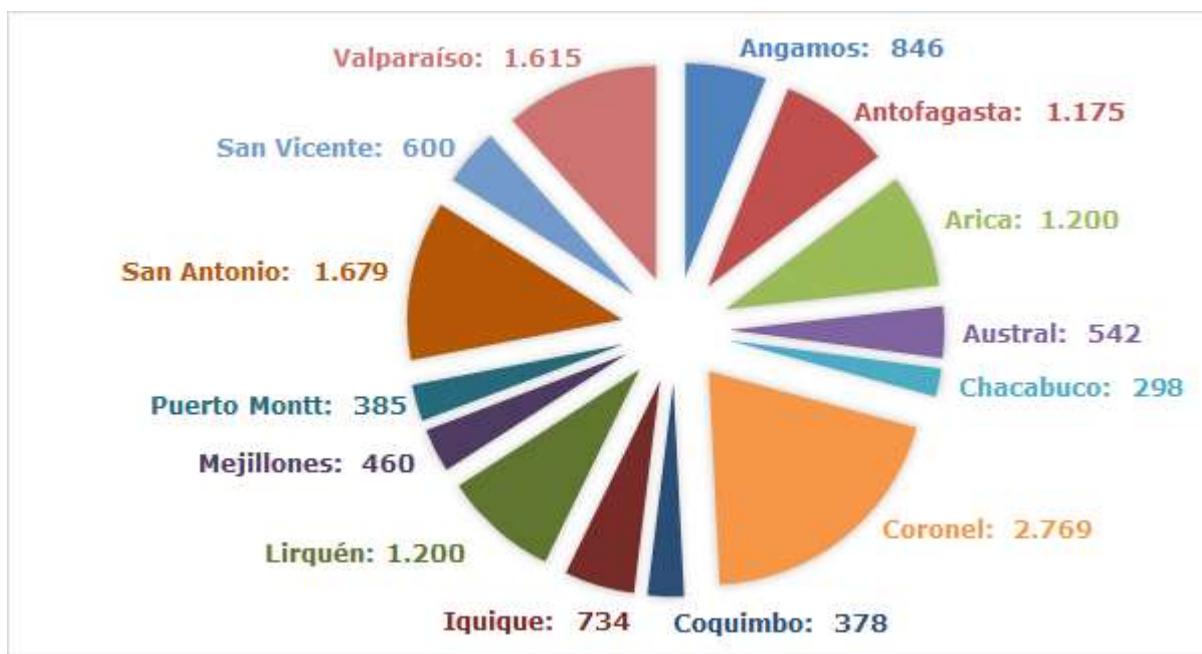
Puerto	Contenedores	Graneles	Multipropósito	Autotransbordo	Total
Arica	0	0	4	0	4
Iquique	1	0	3	0	4
Angamos	0	0	4	0	4
Mejillones	0	2	0	0	2
Antofagasta	0	0	6	0	6
Coquimbo	0	0	2	0	2
Valparaíso	3	0	5	0	8
San Antonio	3	2	4	0	9
San Vicente	0	0	3	0	3
Lirquén <sup>a</sup>	2	3	0	0	6
Coronel	2	1	4	0	7
Puerto Montt	0	0	2	1	3
Chacabuco	0	0	4	1	5
Austral	0	0	9	0	9

<sup>a</sup>El puerto posee seis sitios de atraque pero desconocemos la tipología de uno de ellos

Fuente: Elaboración propia. Ministerio de Transporte-Telecomunicaciones de Chile y puertos

En la Figura 56 se muestra que los puertos que cuentan con una mayor longitud de muelles son Coronel (2.769 m), San Antonio (1.679 m), Valparaíso (1.615 m), Arica y Lirquén (1.200 m) y Antofagasta (1.175 m).

**Figura 56. Longitud de los muelles por puerto (metros), 2014**



\*Datos de Puertos Angamos y Puerto Lirquén relativos al año 2004

Fuente: Elaboración propia. Ministerio de Transporte-Telecomunicaciones de Chile y puertos

Las grúas dispuestas a lo largo de los muelles son las que se muestran en la Tabla 54. De un total de 58 grúas, el 43% están localizadas en los puertos de San Antonio (9 grúas), San Vicente (9 grúas) y Valparaíso (7 grúas). Por el contrario, para cargar (descargar) en los puertos de Austral y Coquimbo, estos deben solicitar los medios mecánicos previamente.

**Tabla 54. Grúas pórtico y móviles por puerto (número), 2014**

<b>Puerto</b>	<b>Grúas</b>
Arica	4
Iquique	4
Angamos	4
Mejillones	3
Antofagasta	3
Coquimbo	0
Valparaíso	7
San Antonio	9
San Vicente	9
Chacabuco	3
Lirquén	6
Coronel	6
Puerto Montt	0
Austral	0
<b>Total</b>	<b>58</b>

Fuente: Elaboración propia. Ministerio de Transporte-Telecomunicaciones de Chile y puertos

En cuanto a los trabajadores portuarios<sup>39</sup> matriculados, los puertos de estudio poseen 43.504 empleados. Los puertos de Valparaíso y San Antonio cuentan con 13.219 y 8.164 trabajadores, respectivamente (Tabla 55). Juntos disponen en torno al 50% de la mano de obra portuaria matriculada. En el lado opuesto se encuentran Chacabuco con 620 empleados, Coquimbo con 1.100 y San Vicente con 1.197. Los trabajadores portuarios vigentes son 20.884. Los puertos de Valparaíso y San Antonio cuentan con 6.370 y 3.847, representando el 47% de la mano de obra portuaria vigente. Por el contrario, Chacabuco cuenta con 134 empleados, San Vicente con 557. Austral con 666 y Coquimbo con 719.

---

<sup>39</sup> Según el artículo 133 del Código del Trabajo Chileno, se entiende por trabajador portuario a todo aquel que realiza funciones de carga (descarga) de mercancía y demás faenas propias de la actividad portuaria, tanto a bordo de naves y artefactos navales que se encuentren en los puertos de la República, como en los recintos portuarios.

**Tabla 55. Trabajadores portuarios por puerto (número), 2014**

<b>Puerto</b>	<b>Trabajador portuario matriculado</b>	<b>Trabajador portuario vigente</b>
Arica	2.959	1.656
Iquique	3.300	1.506
Mejillones	1.407	842
Antofagasta	2.772	1.340
Coquimbo	1.100	719
Valparaíso	13.219	6.370
San Antonio	8.164	3.847
San Vicente	1.197	557
Chacabuco	620	134
Lirquén	2.231	1.018
Coronel	3.640	2.196
Puerto Montt	1.866	1.051
Austral	1.029	666
<b>Total</b>	<b>43.504</b>	<b>21.902</b>

\*Datos de Puertos Angamos no disponibles

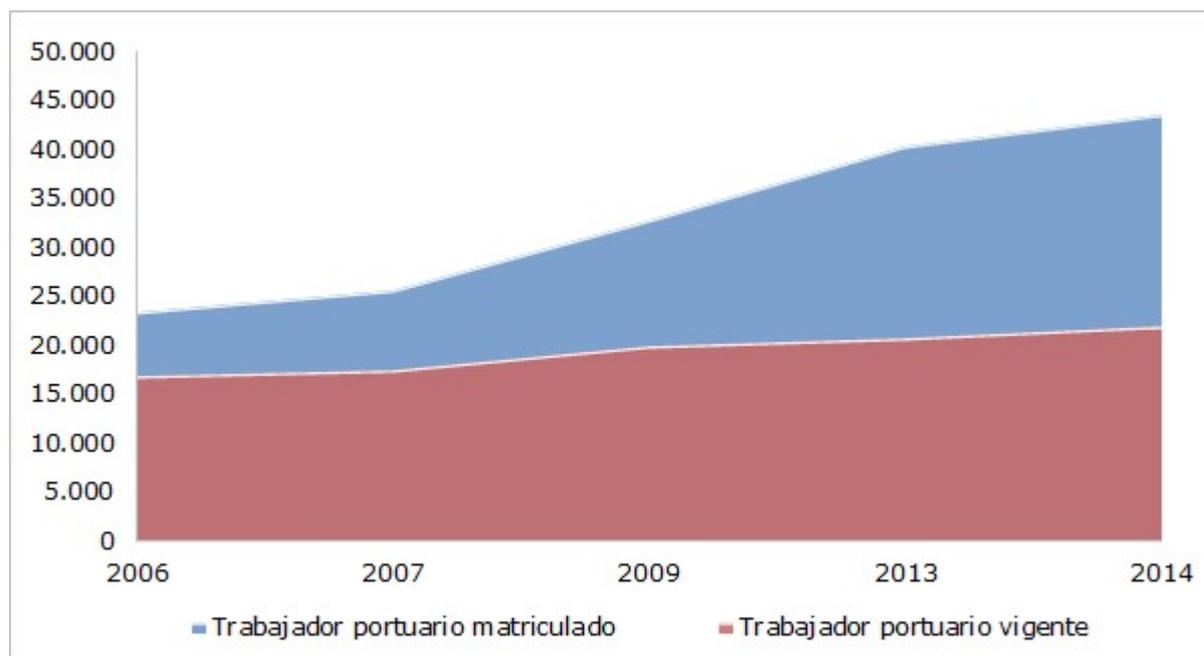
Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2015)

La Figura 57 muestra el total de trabajadores portuarios que trabajaron en los puertos de estudio<sup>40</sup> en los años 2006, 2009, 2013 y 2014. Concretamente, en 2006 los trabajadores matriculados fueron 23.448, considerándose vigentes 16.880. En 2014, el número de matriculados ascendió a 43.504, estando el 50% vigente. Durante el periodo, tanto unos como otros presentaron una tasa de crecimiento anual acumulada positiva (8% y 3%, respectivamente).

---

<sup>40</sup> Datos de Puerto Angamos no disponibles.

**Figura 57. Evolución de trabajadores portuarios (número), 2006-2014**



Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2007, 2008, 2010, 2014,2015)

## 5.6 Puerto Valparaíso y Puerto San Antonio

En este apartado se realiza un análisis comparativo de los principales puertos de contenedores de Chile: Valparaíso y San Antonio, los cuales mueven poco más de la mitad del tráfico total de contenedores. La comparación se centra en aspectos como sus instalaciones, el tráfico manejado, así como en indicadores de productividad, financieros y de rentabilidad.

Puerto Valparaíso y Puerto San Antonio están situados en el centro de Chile y distan entre sí aproximadamente 60 kilómetros. Ambos manejan carga general y contenedores y el Puerto de San Antonio mueve además granel sólido y líquido (Tabla 56).

Los principales terminales de estos puertos están gestionados en régimen monooperado por empresas concesionarios, salvo el terminal 9 (granel líquido) del Puerto de San Antonio, que es explotado por la Empresa Portuaria San Antonio.

Si bien ambos puertos permiten la entrada de buques similares (algo más grandes en el Puerto de San Antonio), las condiciones de maniobrabilidad y operacionales están más restringidas en este último.

**Tabla 56. Descripción de las instalaciones portuarias**

<b>Instalaciones portuarias</b>	<b>Puerto Valparaíso</b>	<b>Puerto San Antonio</b>
Descripción general	2 frentes de atraque: -carga general, contenedores -pasajeros	4 frentes de atraque: -contenedores, carga general, graneles sólidos y graneles líquidos (sitios 1,2,3) -contenedores, carga general y graneles sólidos (sitios 4,5,6,7) -graneles sólidos (sitio 8) -graneles líquidos (sitio 9)
Ubicación geográfica	Latitud: 33° 00' 30'' Sur Longitud: 71° 36' 00'' Weste	Latitud: 33° 35' Sur Longitud: 71° 38' Weste
Propietario (empresa autónoma del Estado)	Empresa Portuaria Valparaíso (EPV)	Empresa Portuaria San Antonio (EPSA)
Concesiones	-Terminal Pacífico Sur Valparaíso (TPS): sitios 1 a 5 - Terminal de Cerros de Valparaíso (TCVAL): sitios 6 a 8	San Antonio Terminal Internacional (STI): sitios 1 a 3 Puerto Central SA (PCE): sitios 4 a 7 Puerto Panul SA (PPSA): sitio 8 Empresa Portuaria San Antonio (EPSA): sitio 9
Dirección y velocidad de viento dominante	Vientos del 3º y 4º cuadrante de 15-20 nudos Sin información sobre dificultades de las faenas	Vientos del 3º y 4º cuadrante Mucha información sobre dificultades de las faenas
Dirección y velocidad de la corriente al interior de la bahía	Corriente dirección sur de 1 nudo	Corriente dirección norte de 2-3 nudos
Tipo de fondo	Fango y arena	Fango y cascajo
Fondeo a la gira	Es posible	No se recomienda
Longitud de atraque (metros)	1.511	1.652
Calado máximo (metros)	13,8	13,5
Eslora máxima (metros)	235 o condicionado al calado	365
Manga máxima (metros)	No disponible	45,6 o de acuerdo a la eslora
Desplazamiento máximo (toneladas)	No disponible	149.000
Maniobras simultáneas	Siempre que puedan ejecutarse con seguridad	No se pueden realizar
Maniobras de abarloadamiento	Siempre que puedan ejecutarse con seguridad	Muy restringidas
Limitaciones operacionales: maniobras diurnas y/o nocturnas	Sin restricción	Sin restricción, excepto en el sitio 9 donde no se puede atracar en horas de oscuridad
Uso obligatorio de remolcadores	2 remolcadores para cada maniobra	Eslora inferior a 270 m, 2 remolcadores Eslora superior a 270 m, 3-4 remolcadores

Fuente: Elaboración propia. Armada de Chile (2013, 2014)

La comparación de las cifras de tráfico portuario es favorable al Puerto San Antonio, aunque la diferencia no es muy grande (ver Tabla 57). Este puerto recibe más y mayores buques, en términos medios, que Valparaíso, siendo atendidos estos buques en un tiempo similar.

La carga de exportación es algo mayor en el Puerto Valparaíso, tanto en cantidad como en valor. La cantidad de mercancía importada en el Puerto San Antonio casi duplica la del Puerto Valparaíso y su valor también es mayor, aunque en este caso la diferencia entre los puertos es bastante más reducida. La mercancía en cabotaje manejada en Puerto San Antonio, es 8 veces superior a la de Puerto Valparaíso. Entre estos dos puertos se mueve algo más de la mitad de los contenedores de todo el sistema portuario de Chile, siendo el tonelaje en contenedor algo mayor en San Antonio.

**Tabla 57. Resumen de tráfico portuario (2014)**

<b>Movimiento de naves</b>	<b>Puerto Valparaíso</b>	<b>Puerto San Antonio</b>
Nº naves recaladas <sup>1</sup>	803	1.107
Total de TRG de naves recaladas <sup>1</sup>	27.894.729	42.308.529
Tamaño medio de naves recaladas <sup>1</sup>	34.738	38.219
Portacontenedores recalados <sup>1</sup>	353	527
Portacontenedores puerto/total portacontenedores, % <sup>1</sup>	16,6	25,0
Tiempo promedio de permanencia en horas de naves atracadas <sup>1</sup>	30,5	31,0
Número total de faenas de practica <sup>2</sup>	1.887	2.468
<b>Movimiento de carga</b>		
Tonelaje total movilizado en exportación	3.774.812	3.484.782
Valor FOB en (miles US\$) de exportación	10.016.778	8.236.368
Tonelaje total movilizado en importación	4.572.697	8.152.697
Valor FOB en (miles US\$) de importación	13.188.632	15.740.495
Tonelaje total movilizado en cabotaje	163.821	1.315.027
Contenedores (toneladas)	9.302.439	10.622.619
Contenedores puerto/total contenedores (%)	26	29

<sup>1</sup>Considera naves que efectuaron faenas de practica: atraque, amarre de boyas y amarre a una boya

<sup>2</sup>Considera todas las faenas de practica que efectúan las naves en puertos

Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2014)

Un análisis sobre la eficiencia portuaria sería conveniente para especificar cuales son los puertos de Chile que aprovechan mejor sus recursos (González y Trujillo, 2009). Sin embargo dada la escasez de datos se ha optado por hacer un análisis de productividad de los dos puertos de los dos puertos principales de la región Central de Chile, San Antonio y Valparaíso. En la Tabla 58 se ofrecen algunos indicadores de productividad portuaria para los puertos en cuestión. Exceptuando el indicador de contenedores por grúa, que es algo mayor en Puerto Valparaíso, el resto de indicadores es favorable a Puerto San Antonio.

**Tabla 58. Indicadores de productividad (2014)**

<b>Indicadores de productividad</b>	<b>Puerto Valparaíso</b>	<b>Puerto San Antonio</b>
Contenedores (ton)/muelle	5.622	6.327
Contenedores (ton)/grúas	1.297.129	1.180.291
Contenedores (ton)/trabajadores matriculados	687	1.301
Contenedores (ton)/trabajadores vigentes	1.425	2.761
Tráfico total (ton)/muelles	6.696	9.634
Tráfico total (ton)/grúas	1.544.894	1.797.337
Tráfico total (ton)/trabajadores matriculados	818	1.981
Tráfico total (ton)/trabajadores vigentes	1.698	4.205

Fuente: Elaboración propia. DIRECTEMAR (2014). Ministerio de Transporte-Telecomunicaciones de Chile y puertos

En la Tabla 59 se describen los principales ratios financieros y económicos.

**Tabla 59. Ratios financieros (descripción)**

<b>Ratios financieros y económicos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Óptimo</b>
Ratio de garantía	Activo/Pasivo exigible	1,5-2
Ratio de liquidez	Activo corriente/Pasivo corriente	1-2
Ratio de tesorería	Disponible/Pasivo corriente	0,1-0,3
Ratio de endeudamiento	Pasivo/Patrimonio neto	0,5
Ratio de financiación del inmovilizado	Activo con corriente/Pasivo no corriente	<1
Ratio de autonomía	Recursos propios/Exigible total	0,8-1,5
Ratio de calidad de la deuda	Exigible a cortoplazo/Exigible total	0,2-0,5
Rentabilidad económica	Beneficios antes de impuestos e intereses/Activo	Cuanto mayor, más rentabilidad
Rentabilidad financiera	Resultado del ejercicio/Patrimonio neto	

Como se puede observar en la Tabla 60, la ratio de garantía indica que ambos puertos se financian con exceso de recursos propios, situación que es más intensa en Puerto San Antonio. La liquidez es correcta en los dos puertos, mientras que los puertos tienen recursos de tesorería ociosos, sobre todo Puerto San Antonio. La siguiente ratio, similar en ambos puertos, indica un endeudamiento. Un exceso de endeudamiento puede llevar a una pérdida de autonomía y a una descapitalización de los puertos. La ratio de financiación del inmovilizado muestra, en los dos puertos, que el activo no corriente no está siendo financiado por el pasivo no corriente. Ambos puertos presentan autonomía financiera y el volumen de deudas a corto plazo es inferior a las deudas a largo plazo.

Las dos últimas ratios miden la rentabilidad de las inversiones efectuadas. Tanto la rentabilidad económica, que ofrece una valoración de la productividad del activo de los puertos, como la rentabilidad financiera, que indica la rentabilidad obtenida en función de la financiación utilizada, es algo mayor en Puerto San Antonio.

**Tabla 60. Ratios financieros (2015)**

<b>Ratios financieros y económicos</b>	<b>Puerto Valparaíso</b>	<b>Puerto San Antonio</b>
Ratio de garantía	2,73	3,10
Ratio de liquidez	1,48	1,62
Ratio de tesorería	0,62	1,04
Ratio de endeudamiento	1,58	1,48
Ratio de financiación del inmovilizado	3,26	3,53
Ratio de autonomía	1,73	2,10
Ratio de calidad de la deuda	0,30	0,23
Rentabilidad económica	0,04	0,08
Rentabilidad financiera	0,05	0,07

Fuente: Elaboración propia. Puerto Valparaíso y Puerto San Antonio

## **5.7 Conclusiones**

El sistema portuario chileno está formado por puertos comerciales de uso público, de los cuales 10 están gestionados por empresas estatales y 14 por empresas privadas, y por puertos de uso privado, de los que 15 son mineros y 17 petroleros. De todos estos puertos en este apartado se han analizado todos los puertos gestionados por las empresas estatales y, de los gestionados por empresas privadas, los puertos Angamos, Coronel, Lirquén y Mejillones, por ser los que se utilizan en el modelo de identificación de Autopistas del mar competitivas en Chile y de sus flotas óptimas.

En primer lugar, se analiza la evolución del conjunto del sistema portuario chileno para el periodo 2006-2014, atendiendo tanto al tráfico de mercancía (tipo de carga, tipo de tráfico) como a la evolución del número de buques atendidos en los puertos chilenos.

En segundo lugar, se realiza una descripción de los puertos comerciales de uso público gestionados por empresas estatales.

En tercer lugar, se estudia la evolución del tráfico (2006-2014) y la dotación actual (2014) de factores productivos de los puertos que conforman la muestra de estudio en el modelo de identificación de Autopistas del mar y de sus flotas óptimas.

Por último, se presentan una serie de indicadores relativos a los puertos de Valparaíso y San Antonio por ser estos los que presentan un tráfico y una dotación de instalaciones notablemente superior al resto.

Los puertos comerciales de uso público gestionados por empresas estatales pueden ser monoproducidos, lo que implica una concesión por un tiempo determinado, o multiproducidos. Del tráfico total que recibieron estos puertos en 2014, el 70% correspondió a carga contenedorizada, el 18% a carga a granel y el 13% a mercancía fraccionada. El 68% de los contenedores se concentraron en los puertos de San Antonio y Valparaíso. Estos puertos tienen 3 puestos de atraque especializados en contenedores y cuentan con un número elevado de medios

mecánicos. Puerto San Antonio dispone de 9 grúas, dos más que Valparaíso y San Antonio posee un menor número de trabajadores portuarios (tanto matriculados como vigentes).

Si a los puertos considerados anteriormente, se les añade los puertos privados de Angamos, Coronel, Lirquén y Mejillones, se puede decir que en 2014 el 43% del tráfico correspondió a carga general, el 28% a granel sólido, el 20% a granel líquido y el 8% a mercancía frigorizada. Si bien la mercancía general continúa siendo el principal tipo de mercancía atendido en puerto, al incluir los cuatro puertos privados el porcentaje es menor en favor de los graneles. Asimismo, a los tres puertos públicos con puestos de atraques especializados en mercancía contenedorizada (San Antonio, San Vicente y Valparaíso), se les unen Coronel y Lirquén con 2 puestos cada uno. Entre estos cinco puertos movieron el 83% del total de contenedores movidos por el conjunto del sistema chileno. Además, tanto el puerto de Coronel como el de Lirquén cuentan con 6 grúas para el manejo de mercancía y el primero dispone de una línea de atraque de 2.769 m, por delante de San Antonio (1.679 m) y Valparaíso (1.615 m). Por otra parte, Lirquén y Coronel tienen 1.018 y 2.196 trabajadores portuarios, por detrás de San Antonio (3.847) y Valparaíso (6.370). San Antonio y Valparaíso poseen cerca del 50% de la mano de obra portuaria de los puertos de estudio.

Puerto San Antonio y Puerto Valparaíso se configuran como los principales puertos del país en tráfico de contenedores, moviendo poco más de la mitad de los contenedores totales del sistema portuario chileno. Por su situación geográfica, por su dotación de infraestructura e instalaciones y por los servicios que prestan ambos podrían optar a convertirse en el gran puerto del país.

Se han mostrado las principales características de las instalaciones portuarias y de la naturaleza del tráfico de mercancías al tiempo que se han empleado diferentes indicadores para comparar ambos puertos, tanto desde la óptica de la productividad como de ratios financieros y de productividad. La mayoría de ellos apuntan a San Antonio como mejor posicionado frente a Valparaíso

Es preciso tener en cuenta que en la resolución de la habilitación de las instalaciones portuarias del Puerto de San Antonio, se hace referencia a dificultades en las maniobras de transferencia de los prácticos, en la eficiencia de los remolcadores y en la maniobrabilidad de las naves en situaciones de oleaje. En estos casos, además se complica las maniobras de atraque y desatraque y la permanencia de las naves en los sitios 8 y 9. En este puerto no está permitido el fondeo a la gira. En la resolución que habilita las instalaciones del Puerto Valparaíso no se hace mención a dificultades por oleaje o vientos, no se sabe si es que no las hay o no se contemplaron en dicha resolución.

## 6 Conclusión general

Para estimar los modelos analizados en este informe se han incorporado los datos de demanda del estudio de FDC Consultores, (2015). El resto de información que se ha añadido proviene, básicamente, de Sabonge y Lugo (2014), y de las estadísticas de varias instituciones como se ha explicado a lo largo del documento.

Comúnmente, la demanda de servicios portuarios depende de la exportación e importación de mercancías. Concretando para el caso de Chile (**capítulo 2**) y desagregando por tipo de mercancías, la principal exportación es el cobre seguido por productos agropecuarios. La demanda de cobre, a su vez, depende enormemente de China país que está experimentando una caída considerable en su ritmo de crecimiento (el más bajo desde 1990), inestabilidad bursátil y salida de capitales. Además, la economía China se transforma hacia una economía basada en los servicios y en el consumo lo que sugiere que sus requerimientos de cobre por unidad de PIB están disminuyendo. En cuanto a la importación de mercancías, esta guarda una alta elasticidad respecto del PIB chileno, pero la economía chilena está disminuyendo su crecimiento y se espera que en el futuro aumente la demanda de servicios y no tanto de mercancías. Todo lo anterior invita a ser prudentes en relación al crecimiento futuro de la demanda de servicios portuarios en Chile.

Respecto al estudio de la planificación de flotas que operan en Chile (**capítulo 3**) hay que destacar que los tres objetivos básicos del proyecto, estimar los servicios que atenderán la demanda proyectada, predecir el tamaño de las naves a utilizar en los diferentes servicios, y mostrar los lotes a embarcar en cada uno de los puertos de las rutas consideradas, han quedado cubiertos mediante la aplicación del modelo diseñado para tal fin. La precisión con la que han sido obtenidas las soluciones permiten responder a las cuestiones planteadas de forma fiable. Las principales conclusiones de este capítulo son:

- Todas las simulaciones indican que la incorporación de buques de gran tamaño (hasta 18.000 TEUs) generaría reducciones en costes de funcionamiento de las navieras, por lo que cabe esperar un aumento de su utilización en el futuro, siempre que se den las condiciones de infraestructura (construcción de nuevos puertos o ampliación de los existentes) y tarifarias para ello.
- En general, el aumento de la demanda implica el incremento de las líneas que se operan. Sin embargo, el incremento del número de líneas que operarían con buques de gran tamaño explica la significativa reducción en el coste por contenedor movido. En cualquier caso, el incremento del número de líneas que operarían con buques de gran tamaño justificaría la adecuación de la infraestructura portuaria a tales circunstancias.
- Para una misma demanda, la ampliación del Canal de Panamá favorece una reducción en el número de líneas activas y un aumento en la utilización de buques de gran dimensión. Este descenso en el número de líneas es

compatible con la tendencia de concentración/asociación observada hasta ahora en las empresas navieras de las rutas contempladas en estudios previos.

- Del análisis efectuado se deduce la relevancia potencial de las actividades de transbordo. Se confirma la importancia de los puertos del Canal de Panamá y surge el puerto de Buenaventura como otra opción a tener en cuenta, siempre que cuente con las infraestructuras necesarias. Por otro lado, puertos como el de Callao y Manzanillo (México), fuera del entorno de América Central, parecen ofrecer menos posibilidades de actuar como puertos *hub* en la región. Esta situación se vería claramente afectada por cambios en la estructura tarifaria de los puertos del entorno.
- Los resultados obtenidos indican que la zona geográfica comprendida alrededor del Canal de Panamá reúne condiciones para el desarrollo de actividades de transbordo. El proyecto del Canal de Nicaragua vendría a ofrecer otra posible opción. La disponibilidad de infraestructuras capaces de recibir buques de gran tamaño, junto con las políticas tarifarias serían determinantes para elucidar la importancia relativa de cada puerto en estas actividades. Los operadores chilenos vinculados al tráfico exterior de mercancías deberían tener en cuenta esta circunstancia en la planificación de sus actividades, considerando la posibilidad de estar presentes de forma más o menos directa en las actividades desarrolladas en estos puertos.

Por tanto, dadas las condiciones de demanda consideradas se estima que, sobre todo con la ampliación del canal de Panamá, los buques que abastecerán Chile serán de mayor porte (hasta 18.000 TEUs) por lo que probablemente reduzcan sus escalas en el país. Además, el análisis llevado a cabo sobre el Sistema Portuario Chileno (SPC) ha verificado que en la actualidad los puertos de la región central no presentan condiciones para acoger este tipo de buques. Por consiguiente, parece inminente la construcción o ampliación de alguna infraestructura portuaria a fin de convertirla en un Puerto de Gran Escala (PGE) en la región central de Chile que sirva de puerto *hub* para abastecer al resto del país (**capítulo 4**). Las conclusiones de este capítulo se resumen en los siguientes puntos:

- Si se construyera este PGE, sería el destino más probable de los buques de gran calado, convirtiéndose en un puerto *hub*, de manera que el transporte al resto del país sea abastecido por el tráfico *feeder*. Consecuentemente y dada la geografía del país, resulta necesario plantearse el transporte puerta a puerta desde este puerto *hub* al resto de regiones del Chile.
- Así, se consideraron dos posibles autopistas del mar desde el puerto *hub*: MOs norte y MOs sur. De manera que, las rutas intermodales ofrezcan servicios de transporte competitivos frente a la alternativa por carretera (la unimodal). Paralelamente se optimizó la flota y el servicio de transporte que maximizarían las oportunidades de éxito de la intermodalidad frente a la unimodalidad.
- De esta manera, se ha obtenido como derivación que los puertos que articulan las rutas intermodales más competitivas frente a la unimodalidad

han sido: la autopista del mar norte San Antonio-Antofagasta y en el sur San Antonio-San Vicente.

- De acuerdo a los resultados alcanzados, las rutas intermodales a través de San Antonio han resultado más competitivas en costes que aquellas a través de Valparaíso mientras que en términos de tiempo, la diferencia entre ellos, como cabía esperar, no resulta significativa.
- Se confirma el interés del establecimiento de la MOs norte con mejoras en costes respecto a la unimodalidad aunque con pequeñas penalizaciones en tiempo respecto a la carretera.
- En el caso de la MOs sur se considera prioritario el equilibrado del flujo en ambos sentidos. Ya que este provoca que la ratio de ocupación en el escenario actual no supere el 60%, claramente insuficiente para asegurar una ventaja en costes respecto a la unimodalidad.
- Desde un punto de vista medioambiental, cualquiera de las soluciones de flota sugeridas en el presente estudio operando en las condiciones indicadas ofrecen alternativas de transporte más sostenibles que la alternativa unimodal.

El análisis del Sistema Portuario Chileno (SPC) se lleva a cabo con la intención de determinar si algunos de los puertos de la región central tienen capacidad para convertirse en un PGE y para comprobar la realidad de todos los puertos para convertirse en parte de una MOs (**capítulo 5**). Se verifica que el SPC está formado por puertos comerciales de uso público, de los cuales 10 están gestionados por empresas estatales y 14 por empresas privadas, y por puertos de uso privado, de los que 15 son mineros y 17 petroleros. Las conclusiones principales de este capítulo se sintetizan de la siguiente manera:

- De todos estos puertos, se han analizado aquellos gestionados por las empresas estatales y, de los gestionados por empresas privadas, los puertos Angamos, Coronel, Lirquén y Mejillones.
- Puerto San Antonio y Puerto Valparaíso se configuran como los principales puertos del país en tráfico de contenedores, moviendo poco más de la mitad de los contenedores totales del sistema portuario chileno. Por su situación geográfica, por su dotación de infraestructura e instalaciones y por los servicios que prestan ambos podrían optar a convertirse en el PGE del país.
- Se han mostrado las principales características de las instalaciones portuarias y de la naturaleza del tráfico de mercancías al tiempo que se han empleado diferentes indicadores para comparar ambos puertos, tanto desde la óptica de la productividad como de ratios financieros y de productividad.
- La mayoría de los indicadores estudiados apuntan a San Antonio como mejor posicionado frente a Valparaíso. Todo ello sin tener en cuenta las condiciones climatológicas que, si bien están presentes en la resolución de la habilitación de las instalaciones portuarias del Puerto de San Antonio, no aparecen en la del puerto de Valparaíso.

Por tanto, de acuerdo a lo analizado en este documento, dadas las demandas estimadas y teniendo en cuenta las limitaciones planteadas, parece claro concluir

que, efectivamente, se requiere un PGE en Chile debido a que los resultados muestran un aumento del porte de los buques que abastecerán al país en un futuro cercano.

Además, se considera que, con las debidas inversiones, el candidato mas adecuado para convertirse en PGE es San Antonio por varios motivos. Primero, porque los resultados de la modelización de las autopistas del mar lo muestran como la mejor opción como puerto *hub* para las MOs norte y sur. Segundo, porque San Antonio presenta mejores condiciones de capacidad y productividad que Valparaíso, según los indicadores portuarios analizados. Por último, porque San Antonio presenta un fuerte potencial de crecimiento puesto que, dadas sus características técnicas, podría concesionar mas de una terminal, mientras que Valparaíso, con un solo delantero, solo tendría capacidad para una terminal. Esta idea debe ser tomada con cautela ya que los datos disponibles no aclaran si las condiciones climatológicas de San Antonio son las adecuadas.

## 7 Referencias

- Armada de Chile (2013). Habilitación de las instalaciones portuarias del Puerto de Valparaíso. C.P. (V.) Ordinario nº 12.000/461/VRS.
- Armada de Chile (2014). Habilitación de las instalaciones portuarias del Puerto de San Antonio. C.P.S.A. Ordinario nº 12.000/55/VRS.
- Baird A., (2007). 'The economics of Motorways of the Sea'. *Maritime Policy & Management* vol. 34(4), pp. 287-310.
- Bendall H., and Brooks M. (2011). 'Short Sea shipping: lessons for or from Australia'. *Int. J. Shipping and Transport Logistics* vol. 3(4), pp. 384-405.
- Bendall H., and Stent A. A. (2001). 'A scheduling model for a high speed containership service: A hub and spoke short-sea application.'. *Internat. J. Maritime Economics* 3(3) pp:262-277
- Bickel, P., Friedrich, R., Burgess, A., Fagiani, P., Hunt, A., Jong, G. D., Laird, J., Lieb, C., Lindberg, G., Mackie, P., Navrud, S., Odgaard, T., Ricci, A., Shires, J., Tavasszy, L., (2006). HEATCO (Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment) Deliverable 5: Proposal for harmonised guidelines. Stuttgart: Institut für Energiewissenschaft und Rationelle Energieanwendung.
- BOE Nº 92 (2006). Boletín oficial del estado español nº 265. Bases reguladoras de las Autopistas del mar entre España y Francia [Free translation in English: Rules for the Sea Motorways between Spain and France] [http://www.puertos.es/en/licitaciones/autopistas\\_mar/index.html](http://www.puertos.es/en/licitaciones/autopistas_mar/index.html) [Accessed 30 November 2009]
- Caamano, P., Tedin, R., Paz-Lopez, A., & Becerra, J. A. (2010). JEAFF: A java evolutionary algorithm framework. In *Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on* (pp. 1-8). IEEE.
- Castells i Sanabra, M. (2009). Short sea shipping efficiency analysis considering high-speed craft as an alternative to road transport in SW Europe. PhD Thesis. Department of Naval Science and Engineering, Polytechnic University of Cataluña.Spain
- Chang C. and Chow I. (2010). The integrated plan of container management for a short-sea carrier. *Proceedings of 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists*.Lisbon
- Daganzo C. (2005). 'Many to many distribution' in Daganzo C. *Logistic systems Analysis*. Berlin Springer
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2), 182-197.

Decreto de la Armada de Chile. (1979). <https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiptNn5zvrMAhVDArQKHVzbBCEQFggvMAI&url=http%3A%2F%2Fdocplayer.es%2F13585253-Armada-de-chile-manual-de-trabajo-del-reglamento-de-tarifas-y-derechos-de-la-direccion-general-del-territorio-maritimo-y-de-marina-mercante.html&usq=AFQjCNGze19TUmrHuJU-uIHxKm7sJhAGeg> [Accessed 12 Abril 2016]

Engineering & Physical Sciences Research Council (EPSRC) and UK Department for Transport DfT. (2002-2003) UK Marine Motorways Study. DfT LINK Future Integrated Transport (FIT) Programme.

Engle, R.F., C.W.J. Granger, S. Hylleberg and H.S. Lee (1993). "Seasonal Cointegration: The Japanese Consumption Function". *Journal of Econometrics*, 55, 275-303.

FDC Consultores (2015). "Análisis de la Demanda de Largo Plazo en Puertos Estatales de la Región de Valparaíso" MTT.

Feng C. and Chang C. (2008). Optimal slot allocation in intra-Asia service for liner shipping company. *Maritime economics and logistics*, 10 pp:295-309

Feo, M., Espino R., García, L. (2010). 'An stated preference analysis of Spanish freight forwarders modal choice on the south-west Europe Motorway of the sea' *Transport Policy*, 18, 60-67.

Franses, P.H. (1990). "Testing for Seasonal Unit Roots in Monthly Data". *Econometric Institute Report 9032A*, Erasmus University, Rotterdam.

Franses, P.H. (1991). "Seasonality, Non-stationarity and the Forecasting of Monthly Time Series". *International Journal of Forecasting*, 7, 199-208.

Franses, P.H. (1996). *Periodicity and Stochastic Trends in Economic Time Series*. Oxford: Oxford University Press.

Franses, P.H. (1998). *Time Series Model for Business and Economic Forecasting*. Cambridge University Press.

Franses, P.H. and McAleer, M. (2002). "Cointegration analysis of seasonal time series". *Journal of Economic Surveys*, 12, 5, 651-678.

García-Alonso and Sánchez-Soriano (2010). Analysis of the Evolution of the Inland Traffic Distribution and Provincial Hinterland Share of the Spanish Port System, *Transport Reviews* 30(3), pp: 275-297.

Garcia-Menendez L., Feo-Valero M. (2009). 'European Common Transport Policy and Short Sea Shipping: Empirical Evidence Based on Modal Choice Models' *Transport Reviews*, Vol. 29(2), pp. 239-259

Gesé X. and Baird A., (2013). Motorways of the sea policy in Europe. *Maritime Policy & Management* vol. 40(1), pp. 10-26.

González, M. and Trujillo, L. (2009). Efficiency Measurement in the Port Industry: A Survey of the Empirical Evidence, *Journal of Transport Economic and Policy* 43(2), pp.157-192.

Grosso M., Lynce, A., Silla A., (2010). Short Sea Shipping, intermodality and parameters influencing pricing policies: the Mediterranean case. *NETNOMICS: Economics research and Electronic Networking*, vol11 (1) pp:47-67

Hausmann, R. and Hidalgo, C. (2014). *The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. MIT Press.

Hjelle M. H. (2010). Short Sea Shipping Green 's Label at risk. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary* vol. 30(5), pp. 617-640.

Hjelle M. H. and Fridell E. (2012). When is Short Sea Shipping environmentally competitive? Oosthuizen J.(ed) *Environmental Health –Emerging issues and practice*. Croatia:InTech

Holland, M., Pye, S., Watkiss, P., Droste-Franke, B., Bickel, P., (2005). Service contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the Clean Air for Europe (CAFE) programme. Damages per tonne of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOC's of EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas. Oxon: AEA Technology Environment.

IMO, (2008). Revised MARPOL Annex VI: Regulations for the prevention of air pollution from ships and NOx technical code London: IMO Marine Environmental Protection Committee (MEPC)

INE (2013). Instituto Nacional de Estadística de Chile. Anuarios Transporte por Carretera. Infografía del transporte por carretera 2013.

International Maritime Organization (1994). SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea) Chapter X - Safety measures for high-speed craft.

International Maritime Organization (2000). International Code of Safety for High-Speed Craft (resolution MSC.36 (63)) and High-Speed Craft Code 2000

Jiang L. and Kronbak J., (2012). The model of maritime external costs Work Package 1, report n°06, june 2012. Project n 2010-56: Emissionsbeslutingsstottesystem. Cophanguen: University of southern Denmark.

Jiang L. Kronbak J and Christensen L. (2014). The cost and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Transportation Research Part D*. Vol.28 May 2014, pp:19-27

Johansen, S. (1991). "Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models". *Econometrica*, 59, 1551–1580.

Johansen, S. and Juselius, K. (1990). "Maximum likelihood estimation and inference on cointegration—With applications to the demand for money". *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 52, 169 – 210.

- Johansen, S. and Juselius, K. (1992). "Testing Structural Hypotheses in a Multivariate cointegration Analysis of the PPP and the UIP for UK". *Journal of Econometrics*, 53, 211-244.
- Kristensen H. (2012). Energy demand and exhaust gas emissions of ships. Work Package 2 of Project Emissionsbeslutningsstottesystem. Copenhagen: Technical University of Denmark.
- Lamb, T., (2004). *Ship Design and Construction*. The Society of Naval and Marine engineering. Jersey City, (USA)
- Lee P., Hu K. and Chen T. (2010). External costs of domestic container transportation: short-sea-shipping versus trucking in Taiwan. *Transportation Reviews* vol.30(3) pp:315-355
- Lützen M and Kristensen H (2012). A model for prediction of propulsion power and emissions tankers and bulk carriers. *Proceedings of World Maritime Technology Conference, 2012*. Saint-Petersburg, Russia
- Maibach M. Schreyer C. Sutter D. Essen H.P.V., Boon B.H., Smokers R., Schrote A., Doll C., Pawlowska, B. Bak M.(2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector*. Delft: CE Delft.
- Mangan, J., Lalwani, C., Gardner, B. (2001). 'Identifying relevant variables and modeling the choice process in freight transportation'. *International Journal of Maritime Economics*, Vol. 3, No. 3, pp.278-297.
- Martin Stopford. (2009). *Maritime Transport* (3<sup>rd</sup> edition). New York: Routledge
- Martínez-López, A.,Caamaño P.,Castro L., (2015a) Definition of optimal fleets for Sea Motorways: the case of France and Spain on the Atlantic coast; *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(1), pp: 89-113
- Martínez-López A, Munín Doce A., García-Alonso, L., (2015b). A multi-criteria decision method for the analysis of the motorways of the sea: the application to the case of France and Spain on the Atlantic coast *Maritime Policy and Management* 42 (6) pp: 608-631
- Martínez-López A.; Kronbak J. Jiang L., (2015c). Cost and time models for the evaluation of intermodal chains by using Short Sea Shipping in the North Sea Region: Rosyth-Zeebrugge route. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(4), pp: 494-520
- Mbiydenyuy, G., Persson, J. and Henesey, L. (2010). A decision support method for analysing a short sea shipping link from a port infrastructure perspective. *Proceedings of 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists*.Lisbon.
- Medda, F. and Trujillo, L. (2010). Short-Sea-Shipping: an analysis of its determinants, *Maritime Policy and Management* 37(2), pp. 285-303.
- Murray. W. (2016). *Economies of Scale in Container Ship Costs*. United States Merchant Marine Academy.

<https://www.usmma.edu/academics/%E2%80%9Ceconomies-scale-container-ship-costs%E2%80%9D-midshipman-william-murray-class-2016> [Accessed 3 de Septiembre de 2016]

Nellthorp, J., Sansom, T., Bickel, P., Doll, C. and Lindberg, G. (2001). Valuation conventions for UNITE. ITS, University of Leeds, Leeds.

Ng A.K.Y. and Kee J. K.Y. (2008). The optimal ship sizes of container liner feeder services in Southeast Asia: a ship operator's perspective. *Maritime Policy & Management* vol.35(4) pp: 353-376.

Ng, A.K.Y. (2009) Competitiveness of short sea shipping and the role of port: the case of North Europe *Maritime Policy and Management* Vol. 36, pp.337-352.

Ntziabachristos and Samaras, (2012) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009 (updated May, 2012). Chapter: Passenger cars, light duty trucks, heavy duty vehicles including buses and motorbikes. The European Environment Agency.

Otero Rivera, C. (2002a). Funciones matemáticas que relacionan las características principales en los buques portacontenedores (parte 1ª). *Ingeniería Naval*, 795, Julio-agosto, 2002, pp 84-93.

Otero Rivera, C. (2002b). Funciones matemáticas que relacionan las características principales en los buques portacontenedores (parte 2ª). *Ingeniería Naval*, 796, Julio-agosto, 2002, pp 129-137.

Paixao, A. and Marlow, P. (2002) 'Strengths and weaknesses of short sea shipping', *Marine Policy*, Vol. 26, No. 3, pp.167-178.

Perez-Mesa J., Cespedes-Lorente J., Salinas-Andujar J. (2010). Feasibility study for a Motorway of the Sea (MOS) between Spain and France: Application to the transportation of Perishable Cargo. *Transport Reviews*, vol. 30(4), pp.451-471

Sánchez, R.J., Perroti, D.E. (2012). Looking into the future: big full containerships and their arrival to South American ports. *Maritime Policy & Management* 39(6), 571-588.

Sauri, S. (2006) 'Cost structure in a short sea shipping line', *Journal of Maritime Research*, Vol. 3, No. 2, pp.53-66.

Savonge R. and Lugo E. (2014). Diagnóstico y pronóstico sobre la oferta y demanda de servicios de transporte marítimo de naves de línea regular, entre Chile y el mundo. Subsecretaría de transportes (Ministerio de transportes y telecomunicaciones de Chile)

Shneerson, D. (1981). Investment in port systems: A case study of the Nigerian ports. *Journal of Transport Economics and Policy*, 201-216.

SignificantShips. (2014). The Royal Institution of Naval Architects. [http://www.rina.org.uk/Significant\\_Ships\\_of\\_2014.html](http://www.rina.org.uk/Significant_Ships_of_2014.html) [Accessed 10 de Abril de 2016]

SPIN-HSV project (2003-2005): Shipping quality and safety of High Speed Vessels.(Deliverable D5.8, Public Summary Report of work package nº5) IV Framework Programme of the European Commission for Research and Development. <http://www.spin.mettle.org> [Accessed 3 March 2011].

Suárez-Alemán, A., Trujillo, L. and Medda, F. (2015). Short Sea shipping and Intermodal competition, Maritime Policy and Management. Vol, 42(4).

Suárez-Alemán, A., Cullinane, K. and Trujillo, L. (2014) Time at ports in Short Sea Shipping: when timing is crucial, Maritime Economics and Logistics, vol. 16(4), pp. 399-417.

Subsecretaria de transportes del Gobierno de Chile. Ministerio de transportes y telecomunicaciones (2009) 'Análisis económico al transporte de carga nacional'

Subsecretaria de transportes del Gobierno de Chile. Ministerio de transportes y telecomunicaciones (2011). 'Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana' Steer Davies Gleave.

Tarifas Puerto Buenaventura, Colombia. (2016). Sociedad Portuaria de Buenaventura S.A. <http://www.sprbun.com/web/portal/uso-instalaciones-portuarias-a-la-carga-ii>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto Callao, Perú. (2016). Recuperado el 7 Abril 2016, de APM Terminals. <https://www.apmterminalscallao.com.pe/images/reglamentos/163097733English-version-Tariff-4.1---Effective-as-from-Jan-18th-2016.pdf>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto Cartagena, Colombia. (2016). Contenedores de Cartagena S.A. <http://cisne.puertocartagena.com/opadmco.nsf/vstRefLinkDoc/37D905BEA5D10E2505257899004AA0E2>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto de Bremem, Alemania. (2012). <http://www.bremenports.de/en/location/port-charges/schedule-of-port-charges>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto de Flandes, Bélgica. (2011). <http://www.loodswezen.be/docs/en/loodsgeldtarieven-en.pdf>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto de Goteborg, Suecia. (2011). <http://www.sjofartsverket.se/en/Our-Activities/Pilotage/Pilot-Areas/Goteborg-Pilot-Area/Standards--Procedures/Towage/Towage-Goteborg-Pilot-Station/Towage-Arendal-Skandia--Alvsborgs-harbours/>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas puerto de Houston.(s.f). <http://www.portofhouston.com/static/gen/misc/Tariffs/PHA-Tariff08-2016-0101.pdf>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

Tarifas Puerto de Manzanillo, México. (2016.). Administración Portuaria Integral de Manzanillo S.A. <http://www.puertomanzanillo.com.mx/esps/0000207/tarifas>. [Accessed 7 de Abril de 2016]

- Tarifas Puerto de San Antonio, Chile. (2016). SAAM Puertos S.A. [http://www.stiport.cl/quienes\\_somos/medios/manuales/tarifasgral.pdf](http://www.stiport.cl/quienes_somos/medios/manuales/tarifasgral.pdf). [Accessed 7 de Abril de 2016]
- Tarifas Puerto de Valparaíso, Chile. (2016). Terminal Pacífico Sur. [http://portal.tps.cl/tps/site/artic/20060124/asocfile/20060124152711/anexo\\_tarifas\\_tps\\_12\\_mayo\\_2016.pdf](http://portal.tps.cl/tps/site/artic/20060124/asocfile/20060124152711/anexo_tarifas_tps_12_mayo_2016.pdf). [Accessed 7 de Abril de 2016]
- Tarifas Puerto Guayaquil, Ecuador. (2016). CONTECON S.A. <http://www.cgsa.com.ec/servicios.aspx>. [Accessed 7 de Abril de 2016]
- Tarifas puertos Manzanillo y Balboa, Panamá. (2010). Panamá América, grupo EPASA. <http://www.panamaamerica.com.pa/content/tarifa-por-movimiento-de-contenedores-ser%C3%A1-variable>. [Accessed 7 de Abril de 2016]
- Tongzon, J. L. (1995). "Determinants of port performance and efficiency". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 29(3), 245-252.
- Trujillo, L., Medda, F. and González, M. (2010). An analysis of short sea shipping as an alternative for freight transport, en: Cullinane, K. (ed) *The international Handbook of Maritime Economics*. Edward Elgar, UK. .). vol. 10, pp. 71-85.
- Trujillo, L. and Medda, F. (2009). A Boost for Short Sea Shipping: The Environmental and Economic Determinants, *The Environmentalist* 80, pp.14-20.
- Usabiaga J., Castells M., Martínez X. and Olcer A. (2013). A simulation model for road and maritime environmental performance assessment. *Journal of Environmental Protection* (4): pp:683-693
- Vanherle K. and Delhaye E. (2010). *External costs of maritime transport*. Brussels: European Community of ship's owners' Associations (ECSA)
- Wang C. and Corbett J.(2007). The costs and benefits of reducing SO2 emissions from ships in the US West Coastal waters. *Transportation research Part D* 12 (8): pp: 577-588
- Wang, S. & Meng, Q. (2012). "Liner ship fleet deployment with container transshipment operations", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, no. 2, pp. 470-484.
- Watson D., (2002) *'Practical Ship Design'*. Elsevier. Oxford
- WEST-MOS Project (2005-2008). *Western Europe Sea Transport & Motorways of the Sea Project*. (2<sup>o</sup>Work-Package Report). Co-financed by the European Union from the Trans-European Networks (TEN). [http:// www.westmos.eu](http://www.westmos.eu) [Accessed 3 March 2011]
- Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary computation*, 8(2), 173-195.

## 8 Anexo

### Variables principales:

#### *Subíndices:*

- BB= $\{1, \dots, b\}$  Decisión sobre la instalación de bow thrusters en los buques: sin bow thrusters y con bow thrusters.
- GG= $\{1, \dots, g\}$  Alternativas de sistemas de manejo de la carga: grúas de buque y grúas de puerto.
- PP= $\{1, \dots, p\}$  Tipos de unidades de carga compatibles con los portacontenedores: TEUs y FEUs
- Q= $\{1, \dots, q\}$  Grupo de posibles edades de la flota: 1, 6 y 14 años

#### *Variables:*

- VB Velocidad del buque (Kn)
- $G_p$  Unidades de carga que definen la capacidad del buque;  $\forall p \in PP$
- $E_q$  Edad del buque desde su adquisición;  $\forall q \in Q$
- $MG_g$  Sistemas de manejo de la carga en puerto;  $\forall g \in GG$
- $MM_b$  Medios de maniobra para los buques  $\forall b \in BB$
- $N_{trips}$  Número de viajes de la flota por año.

### Variables auxiliares:

#### *Superíndices:*

- MTA= $\{a, b\}$  Alternativas modales de transporte: acarreo terrestre y cadenas intermodales, respectivamente.
- ST= $\{c\}$  Las rutas MOs evaluadas: MOs Norte y MOs Sur.
- DIS= $\{d\}$  Obligación de conducir con dos conductores en el camión (No y Sí)

#### *Subíndices:*

- A= $\{1, \dots, a\}$  Diferentes tramos que integran las cadenas intermodales: los tramos capilares (tramos por carretera en ambas costas) y el tramo truncal (tramo marítimo).
- C= $\{1, \dots, c\}$  Grupo de partidas de costes considerados para alcanzar el flete mínimo requerido en el transporte marítimo: costes de amortización, costes financieros, costes de seguro, costes de mantenimiento, costes de tripulación, costes de combustible, costes de escala en Puerto (tasas del buque, de la carga, tarifas por práctico, tarifas por remolque y tarifas por amarre y costes por carga/descarga).
- DD= $\{1, \dots, d\}$  Los destinos finales en tierra (nodos) para la red de transporte: En el norte, Iquique, Antofagasta y La Serena; en el sur, Rancagua, Concepción y Temuco (Etapa 1) ó Concepción y Temuco (Etapa 2)
- EE= $\{1, \dots, e\}$  El grupo de tipos de motores propulsores: motores diesel y turbinas.

$FF=\{1,\dots,f\}$	Los diferentes países que estarán afectados por las emisiones contaminantes durante el transporte. En este caso solo Chile estará afectado por el transporte, por tanto $f=1$ y $f=2$ son relativos al mismo país.
$H=\{1,\dots,h\}$	Grupo de posibles propulsores para los buques: hélices convencionales y waterjets
$I=\{1,\dots,i\}$	Número de motores principales para los buques: de uno a cuatro.
$J=\{1,\dots,j\}$	Sentido del transporte (Norte-Sur y Sur-Norte)
$K=\{1,\dots,k\}$	Posibles puertos para establecer las autopistas del mar: Norte; Arica, Iquique, Mejillones y Antofagasta; Sur, San Vicente, Coronel y Puerto Montt.
$M=\{1,\dots,m\}$	Los posibles puertos <i>hub</i> : Valparaíso y San Antonio
$N=\{1,\dots,n\}$	Número de líneas de ejes en cámara de máquinas de los buques: de una a cuatro.
$RR=\{1,\dots,r\}$	Grupo de funciones objetivo para el modelo matemático: diferencia en términos de costs, diferencia en términos de tiempo y diferencia en términos de costes externos entre los modos unimodal y multimodal.
$SS=\{1,\dots,s\}$	Diferentes condiciones durante el transporte marítimo: navegación libre, maniobras (tiempo por uso de práctico, tiempo por uso de remolcador y tiempo por amarre) y atraque (operaciones de carga y descarga)
$TT=\{1,\dots,t\}$	Los tramos capilares en las redes intermodales (tramos por carretera en ambas costas)
$U=\{1,\dots,u\}$	Grupo de contaminantes evaluados: SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>2.5</sub> and CO <sub>2</sub> .
$V=\{1,\dots,v\}$	Grupos de regiones que caracterizan los valores de los costs unitarios de las emisiones contaminantes en los países: zona metropolitana y regiones urbanas.
$WW=\{1,\dots,w\}$	Grupo de servicios portuarios que integran la operación de maniobra de los buques: servicios de práctico, servicios de remolque y servicios de amarre.
$Z=\{1,\dots,z\}$	Los orígenes en tierra (nodos) para la cadena de transporte: centro; Santiago, Valparaíso y puerto de embarque (Valparaíso o San Antonio), en etapa 1 y Santiago, Valparaíso, puerto de embarque (Valparaíso o San Antonio), La Serena y Rancagua en etapa 2

*Variables:*

$\Delta$	Desplazamiento del buque (t)
$\nabla$	Volumen de carena del buque (m <sup>3</sup> )
$B$	Manga del buque (m)
$CC$	El coste de construcción del buque (€)
$CEM$	Costes anuales relativos a las emisiones contaminantes en el tramo marítimo (€)
$CEM_s$	Costes anuales relativos a las emisiones contaminantes para cada estado de operación en el tramo marítimo (€); $\forall s \in SS$
$CEM_{sf}$	Costes medioambientales anuales relativos a cada etapa del tramo marítimo en cada país afectado (€); $\forall s \in SS \wedge \forall f \in FF$
$CET$	Costes medioambientales anuales en el transporte unimodal (€)
$CET_u$	Costes anuales relativos a cada tipo de emisión en el transporte unimodal contaminante (€); $\forall u \in U$

$CETT_t$	Costes anuales totales relativos a la contaminación medioambiental en los tramos de transporte por carretera de las cadenas intermodales (€); $\forall t \in TT$
$CETT_{tu}$	Costes anuales relativos a cada tipo de emisión contaminante en los tramos de acarreo por carretera (€); $\forall t \in TT \wedge \forall u \in U$
$CF_{1u}$	Costes unitarios para las diferentes emisiones contaminantes en navegación libre para el tramo marítimo (€/kG); $\forall u \in U$
$CF_{sufv}$	Costes unitarios para diferentes emisiones contaminantes en las etapas del transporte marítimo considerando los países afectados y las de las zonas afectadas (€/kG); $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$
$CK_p^d$	Costes unitarios por kilómetro para el transporte unimodal, el valor es dependiente del número de conductores necesarios (€/km) $\forall p \in PP \wedge \forall d \in DIS$
$CMU$	Coste de la cadena intermodal (€/(t×trip))
$CMU_a$	Coste de un modo de transporte integrado en una cadena intermodal (€/(t×trip)); $\forall a \in A$
$CT_c$	Costes de los items que integran el coste mínimo requerido para el transporte marítimo (€); $\forall c \in C$
$CU$	Coste final de la alternative de transporte unimodal (€/(t×trip))
$D$	Puntal a cubierta principal (m)
$DM_{mk}$	Distancia marítima de la ruta (km); $\forall m \in M \wedge \forall k \in K$
$DR_{zd}^a$	Distancia para la alternative unimodal (km); $\forall z \in Z \wedge \forall d \in DD$
$DR_{zm}^b$	La distancia de los tramos capilares para las cadenas intermodales hacia/desde los puertos candidatos (km); $\forall z \in Z \wedge \forall m \in M$
$DR_{kd}^b$	La distancia de los tramos capilares para las cadenas intermodales hacia/desde los puertos <i>hub</i> (km); $\forall k \in K \wedge \forall d \in DD$
$EG_{su}$	Coefficientes de emisión para los buques portacontenedores (kg/nm and in kg/h); $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U$
$EGU_{uf}$	Coefficientes de emission para los camiones (gr of pollutant/kg of fuel consumed); $\forall u \in U \wedge \forall f \in FF$
$F_r$	Función objetivo para el modelo de optimización; $\forall r \in RR$
$FB$	Francobordo del buque (m)
$FC_p$	Fuel consumption for trucks by considering the cargo unit transported (gr fuel/km); $\forall p \in PP$
$GT$	Gross Tonnage of vessels (t)
$L$	Eslora de los buques (m)
$MUE$	Costes medioambientales (€/(t×trip)) asociados al transporte multimodal
$NB$	Número de buques
$NG_k$	Número máximo de grúas operativas por buque en el puerto periférico $\forall k \in K$
$NG_m$	Número máximo de grúas operativas por buque en el puerto <i>hub</i> $\forall m \in M$
$NME_i$	Número de motores propulsores para el buque; $\forall i \in I$
$NMG_k$	Número máximo de grúas disponibles para el puerto periférico; $\forall k \in K$
$NMG_m$	Número máximo de grúas disponibles para el puerto <i>hub</i> ; $\forall m \in M$
$NSL_n$	Número de líneas de ejes en un buque; $\forall n \in N$
$P_p$	Peso de las unidades de carga (t); $\forall p \in PP$
$PB$	Potencia propulsora de los buques (HP)
$PV_k$	Población en el hinterland de los puertos candidatos (millones de habitants); $\forall k \in K$
$PV_m$	Población en el hinterland del puerto <i>hub</i> (millones de habitants); $\forall m \in M$

$PVD_d$	Población de los posibles destinos finales (nodos) de las rutas de transporte routes (millones de habitantes); $\forall d \in DD$
$PVO_z$	Población de los posibles nodos origen de las rutas de transporte (millones de habitantes); $\forall z \in Z$
$RE$	Costes medioambientales (€/t <trip)) al="" asociados="" carretera<="" por="" td="" transporte=""> </trip))>
$RE_a$	Costes medioambientales (€/t <trip)) <math="" a="" asociados="" cadenas="" de="" diferentes="" intermodales="" las="" los="" tramos="">\forall a \in A</trip))>
$RM$	Radio metropolitano tomado como referencia para la distancias capilares en las cadenas intermodales (km)
$T$	Calado del buque (m)
$TA1_k$	Tasa por servicio de amarre para buques por debajo de 3000 GT en puerto periférico; $\forall k \in K$
$TA2_k$	Tasa por servicio de amarre de buques por encima de 3000 GT en puerto periférico; $\forall k \in K$
$TA1_m$	Tasa por servicio de amarre para buques por debajo de 3000 GT en puerto periférico; $\forall m \in M$
$TA2_m$	Tasa por servicio de amarre de buques por encima de 3000 GT en puerto periférico; $\forall m \in M$
$TC_{pk}$	Tasa por transferencia de la carga; $\forall p \in PP \wedge \forall k \in K$
$TC_{pm}$	Tasa por transferencia de la carga; $\forall p \in PP \wedge \forall m \in M$
$TB_k$	Tasa por servicio de muellaje al buque en puerto periférico; $\forall k \in K$
$TB_m$	Tasa por servicio de muellaje al buque en puerto <i>hub</i> ; $\forall m \in M$
$TM_{pk}$	Tasa por servicio de muellaje a la carga en puerto periférico; $\forall p \in PP \wedge \forall k \in K$
$TM_{pm}$	Tasa por servicio de muellaje a la carga en puerto <i>hub</i> ; $\forall p \in PP \wedge \forall m \in M$
$TPC1$	Tasa por servicio de práctico para buques por debajo de 10000GT
$TPC2$	Tasa por servicio de práctico para buques por encima de 10000GT
$TR1$	Tasa por servicio de remolque para buques por debajo de 13000GT
$TR2$	Tasa por servicio de remolque para buques por encima de 13000GT
$TME_e$	Tipo de maquinaria principal para los buques; $\forall e \in EE$
$TP_h$	Tipo de propulsor para los buques; $\forall h \in H$
$TS_w$	Tiempo dedicado a cada operación durante el estado de maniobra (h); $\forall w \in WW$
$TVB_s$	El tiempo invertido en los estados de operación durante el transporte marítimo (h) (h); $\forall s \in SS$
$TVM$	Tiempo invertido en el transporte intermodal (h)
$TVM_a$	Tiempo invertido en un modo de transporte Integrado en una cadena intermodal (h); $\forall a \in A$
$TVU$	Tiempo invertido en la alternative unimodal (acarreo terrestre) (h)
$VB$	Velocidad del buque (Kn)
$V_k$	Velocidad media de las grúas en el puerto periférico $\forall k \in K$
$V_m$	Velocidad media de las grúas en el puerto <i>hub</i> $\forall m \in M$
$VT$	Velocidad del camión (km/h)
$X_d$	La probabilidad relative de entrega de una unidad de carga en un determinado nodo respecto al resto de posibles nodos del norte o del sur (%); $\forall d \in DD$
$X_f$	Porcentaje de la distancia por carretera en el transporte unimodal que pertenecen a cada país (%); $\forall f \in FF$

$X_{fd}$	Porcentaje de distancia por carretera desde los puertos candidatos en las cadenas intermodales que pertenecen a cada país (%); $\forall f \in FF \wedge \forall d \in DD$
$X_{fz}$	Porcentaje de distancia por carretera desde los puertos <i>hub</i> en las cadenas intermodales que pertenecen a cada país (%); $\forall f \in FF \wedge \forall z \in Z$
$X_{jz}^c$	La probabilidad relativa de entrega de una unidad de carga en un determinado nodo respecto al resto de posibles nodos del centro para cada tipo de ruta (MOs norte o MOs sur) y sentido (norte-sur o sur-norte) (%); $\forall z \in Z \wedge \forall c \in EST \wedge \forall j \in J$

*Datos: valores asumidos como inputs en el caso de aplicación:*

$CK_{dp}^d$	Costes unitarios por kilómetro para el transporte por carretera, (TEUs y FEUs: $CK_{11}^1=0,27\text{€/km}$ , $CK_{12}^1=0,44\text{€/km}$ ) y con dos conductores (TEUs and FEUs: $CK_{11}^2=0,32\text{€/km}$ , $CK_{12}^2=0,53\text{€/km}$ )
$DM_{mk}$	La distancia marítima de las rutas entre cada posible puerto <i>hub</i> (Valparaíso y San Antonio) y cada posible puerto candidato para el MOs norte (Arica, Iquique, Mejillones y Antofagasta) y para el MOs sur (San Vicente, Coronel y Puerto Montt)
$DR_{zd}^a$	Las distancias desde cada posible par de extremos de rutas: nodos centrales-nodos norte; nodos centrales-nodos en el sur.
$DR_{kd}^b$	Las distancias capilares de las cadenas intermodales en los puertos candidatos a constituir el MOs son aquellas entre los puertos del norte (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta) y cada una de las ciudades norteñas (Iquique, Antofagasta, La Serena) y entre los puertos del sur (San Vicente, Coronel, Puerto Montt) y las ciudades sureñas (Rancagua, Concepción, Temuco)
$DR_{zm}^b$	Las distancias capilares de las cadenas intermodales son aquellas entre los puertos <i>hub</i> (Valparaíso y San Antonio) y cada una de las ciudades centrales (Santiago, Valparaíso, y el propio puerto <i>hub</i> )
$P_p$	Peso de las unidades de carga (TEUs and FEUs: $P_1=12.5$ and $P_2=20.5\text{t}$ )
$PV_k$	Población en el hinterland del Puerto candidato en los puertos del norte (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta) y en los puertos del sur (San. Vicente, Coronel, Puerto Montt, para etapa 1 y sólo los dos primeros para etapa 2)
$PV_m$	Población en los puertos <i>hub</i> ( $PV_1=0.82$ millones de habitantes Valparaíso $PV_2=0.15$ millones de habitantes en San Antonio)
$PVD_d$	Población de los posibles extremos de ruta en el norte y en el sur (Iquique, Antofagasta, La Serena, Rancagua, Concepción y Temuco): $PVD_1=0,215$ ; $PVD_2=0.285$ ; $PVD_3=0.296$ ; $PVD_4=0.236$ ; $PVD_5=0.848$ ; $PVD_6=0.268$ millones de habitantes)
$PVO_z$	Población de los posibles extremos de ruta en el centro Rutas MOs norte (Santiago, Valparaíso, puerto de embarque): $PVO_1=5.61$ ; $PVO_2=0.824$ ; $PVO_3=0.145$ millones habitantes, para etapa 1 y para etapa 2; Santiago, Valparaíso, Puerto de embarque, La Serena y Rancagua; $PVO_1=5.61$ ; $PVO_2=0.824$ ; $PVO_3=0.145$ ; $PVO_4=0.296$ ; $PVO_5=0.236$ )
$RM$	Metropolitan radius taken as a reference for the capillary distance in multimodal chains (30 km)
$VT$	Speed of truck (90 km/h)
$X_d$	Las probabilidades relativas de recibir o enviar una unidad de carga etapa 1: Iquique, Antofagasta, La Serena, Rancagua, Concepción, Temuco (MOs norte: $X_1=26,95\%$ ; $X_2=35,83\%$ ; $X_3=37,21\%$ , $X_4=X_5=X_6=0\%$ ; MOs sur: $X_1=X_2=X_3=0\%$ ; $X_4=17,47\%$ ; $X_5=19,84\%$ ; $X_6=62,69\%$ ); etapa 2: Iquique,

	Antofagasta, Concepción, Temuco (MOs norte: $X_1=43\%$ ; $X_2=57\%$ ; $X_3=X_4=0\%$ ; MOs sur: $X_1=X_2=0\%$ ; $X_4=70.95\%$ ; $X_5=20.04\%$ )
$X_f$	Porcentaje de las distancias terrestres para el transporte unimodal que pertenecen a cada país (Como ambos países son el mismo, Chile: $X_1=50\%$ ; $X_2=50\%$ ); $\forall f \in FF$
$X_{fd}$	Porcentaje de las distancias terrestres en los tramos capilares norte y sur para el transporte multimodal que pertenecen a cada país (Como sólo toca Chile: $X_{1d}=100\%$ ; $X_{2d}=0\%$ ); $\forall d \in DD$
$X_{fz}$	Porcentaje de las distancias terrestres en los tramos capilares del centro para el transporte multimodal que pertenecen a cada país (Como sólo toca Chile: $X_{1z}=100\%$ ; $X_{2z}=0\%$ ); $\forall z \in Z$
$X_{c_{jz}}$	Probabilidad relativa de entregar o recibir una unidad de carga en los nodos centrales para MOs norte :Etapa I: (Santiago, Valparaiso, Puerto de embarque): $X^1_{11}=4,88$ ; $X^1_{12}=0,71\%$ ; $X^1_{13}=94,39$ ; $X^1_{21}=55,26\%$ ; $X^1_{22}=8,09$ ; $X^1_{23}=36,64\%$ ; y para MOs sur (Santiago, Valparaiso, Puerto de embarque) $X^2_{11}=55,97\%$ ; $X^2_{12}=8,19\%$ ; $X^2_{13}=35,84\%$ ; $X^2_{21}=4,73\%$ ; $X^2_{22}=0,69$ ; $X^2_{23}=94,60\%$ ; Etapa II: (Santiago, Valparaiso, Puerto de embarque, La Serena y Rancagua): $X^1_{11}=4,70$ ; $X^1_{12}=0,70\%$ ; $X^1_{13}=94,16$ ; $X^1_{14}=0,25$ ; $X^1_{15}=0,20$ ; $X^1_{21}=60,39\%$ ; $X^1_{22}=88,30$ ; $X^1_{24}=3,17\%$ ; $X^1_{25}=2,53\%$ ; y para MOs sur (Santiago, Valparaiso, Puerto de embarque, La Serena y Rancagua) $X^2_{11}=30,19\%$ ; $X^2_{12}=4,42\%$ ; $X^2_{13}=62,53\%$ ; $X^2_{14}=1,59\%$ ; $X^2_{15}=1,27\%$ ; $X^2_{21}=0,83\%$ ; $X^2_{22}=0,12$ ; $X^2_{23}=98,96\%$ ; $X^2_{24}=0,04\%$ ; $X^2_{25}=0,03\%$ )