

Modelo de ayuda a la decisión en transporte intermodal

Alejandro Escudero, M^a Carmen Delgado, Jesús Muñuzuri, Luis Onieva

Grupo Ingeniería de Organización. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Avd. de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. aescudero@esi.us.es, munuzuri@esi.us.es, mdlgado@esi.us.es, onieva@esi.us.es

Resumen

La posición estratégica que ocupa el transporte intermodal de mercancías está recogida en distintos planes y políticas. No obstante y pese a ello, este modo de transporte no termina de consolidarse como una realidad competitiva al transporte por carretera. Este trabajo tiene como principal objetivo el fomento del transporte intermodal como un modo factible para el envío de mercancías. Para ello presenta; por un lado, una herramienta de ayuda a la decisión para la elección del modo de transporte en el ámbito de la pequeña y mediana empresa; por otro lado, se muestra un análisis de costes del transporte intermodal en España.

Palabras clave: transporte intermodal, costes, árbol decisión

1. Introducción

El transporte de mercancías en España es un sector de enorme y creciente importancia para la industria y el comercio. Sin embargo, la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio Climático, del Ministerio de Medio Ambiente, viene señalando al “crecimiento exagerado” del transporte, que desde 1990 ha aumentado un 80 por ciento, uno de los principales obstáculos que España tiene para cumplir el protocolo de Kioto.

La necesidad de encontrar un equilibrio entre los diferentes modos de transporte para garantizar la movilidad sin afectar a la eficiencia es un hecho, así como la lucha contra la congestión y los efectos medioambientales. Por todo lo mencionado anteriormente, la promoción del transporte intermodal es una prioridad para las autoridades españolas y europeas (ver Comisión Europea, 2001)

El objetivo fundamental de este trabajo es fomentar el transporte intermodal como un modo factible para el envío de mercancías. Para ello se presenta una herramienta de ayuda a la decisión para la elección de un modo u otro de transporte, según la rentabilidad económica del mismo. Esta herramienta permitirá, a través de un estudio de sus resultados, determinar cuellos de botella del transporte intermodal de mercancías, ayudando a determinar futuras inversiones por parte de las administraciones y las empresas interesadas. El trabajo también presenta un análisis de costes del transporte intermodal en España.

2. Escenario y estado de la cuestión

Aunque la cantidad total de mercancías transportada en España es comparable con otros países europeos, la cantidad de estas mercancías que son movidas por tren es significativamente inferior. El transporte por carretera supone más del 80% de las mercancías transportadas y aumenta año tras año, mientras que el transporte por ferrocarril no llega al 5% de los envíos y ha presentado un incremento nulo, incluso una ligera disminución, en los últimos años (ver Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1. Transporte de mercancías por carretera

Transporte interior de mercancías. Año 2005
(miles de toneladas)

| | Total | 3,5-10 Tm | 10-20 Tm | > 20 Tm |
|------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| Servicio público | 1.597.498 | 82.377 | 419.031 | 1.096.089 |
| Menos de 50 Km. | 455.905 | 30.952 | 192.046 | 224.107 |
| 50 a 149 Km. | 595.852 | 29.562 | 169.523 | 396.767 |
| 150 a 499 | 169.167 | 12.190 | 51.256 | 102.131 |
| 500 y más Km. | 76.574 | 1.304 | 2.406 | 72.704 |
| Servicio privado | 550.638 | 92.231 | 259.771 | 188.680 |
| Menos de 50 Km. | 245.413 | 51.718 | 145.127 | 48.569 |
| 50 a 149 Km. | 203.882 | 29.757 | 94.879 | 79.247 |
| 150 a 499 | 99.194 | 10.326 | 29.136 | 59.732 |
| 500 y más Km. | 2.198 | 434 | 633 | 1.132 |
| Total | 2.148.186 | 174.612 | 688.805 | 1.284.769 |

Tabla 2. Transporte de mercancías por ferrocarril

| | Tráfico de mercancías de RENFE | | | | | |
|----------|--------------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|
| | Toneladas (miles) | | | Toneladas-Km. (millones) | | |
| | Vagón completo | | Otros | Vagón completo | | Otros |
| 1997 | 18.033 | 0.950 | 410 | 7.142 | 3.814 | 71 |
| 1998 | 17.841 | 7.132 | 679 | 7.278 | 3.936 | 102 |
| 1999 | 17.492 | 7.319 | 518 | 7.152 | 4.249 | 63 |
| 2000 | 17.715 | 7.598 | 476 | 7.132 | 4.360 | 78 |
| 2001 | 17.680 | 7.538 | 443 | 7.314 | 4.353 | 83 |
| 2002 | 18.264 | 7.548 | 560 | 7.273 | 4.208 | 97 |
| 2003 | 18.419 | 7.825 | 684 | 7.270 | 4.473 | 122 |
| 2004 | 18.614 | 7.730 | 603 | 7.207 | 4.247 | 90 |
| 2005 (1) | 17.944 | 8.940 | 636 | 6.744 | 4.001 | 296 |

Desde el año 2000 el mercado del transporte de mercancías por tren está liberalizado; sin embargo, Renfe es prácticamente el único operador de ferrocarril que existe en España. La red de terminales de mercancías existentes en España puede ser observada en la Figura 1. A pesar que Renfe ha estado atendiendo en los últimos años a su división de transporte de mercancías, su prioridad en el uso de la red sigue siendo para el transporte de pasajeros.

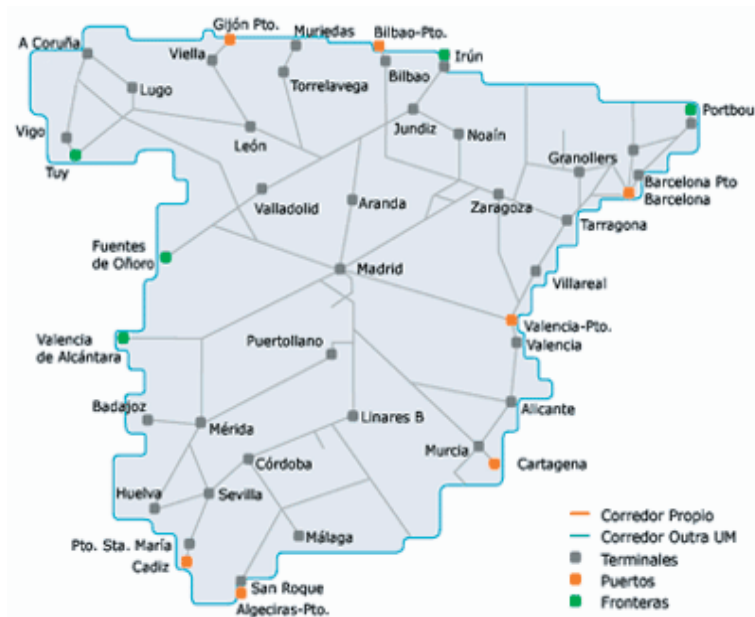


Figura 1. Terminales de mercancías gestionadas por Renfe en España

Uno de los principales enfoques en el problema de la rentabilidad económica del transporte intermodal de mercancías es la teoría del área de mercado de una terminal elaborada por Niérat (1997). Niérat hace una comparativa entre dos modos de transportes y establece fronteras de elección según la conveniencia de un modo u otro desde una visión económica.

Otro de los estudios de mayor importancia en la literatura es el realizado por Fowkes, Nash y Tweddle (1991), que analizan la influencia de la posición relativa de terminales respecto al origen y destino. Definen un modelo espacial para ver qué distancias hacen competitivos en costes al transporte intermodal frente al transporte por carretera.

Morlok y Spasovic (1995) realizan un enfoque diferente y determinan la rentabilidad del transporte intermodal a partir de los 872 Km. Morlok y Spasovic realizan un análisis de distintos factores que influyen en esta elevada distancia, y proponen una serie de estrategias a considerar para la mejora en los costes del transporte intermodal.

Sin embargo, estos modelos tienen una visión más general de la intermodalidad (a un nivel de rentabilidad estratégica), mientras que el modelo que se presenta proporciona una herramienta de uso para la pequeña y mediana empresa, que facilita la elección del actor adecuado en cada trayecto del envío.

3. Colección de datos

Con el fin de representar un proceso de ayuda a la decisión con respecto al transporte intermodal, todos los datos relativos a coste de cada enlace de la cadena intermodal son mostrados a continuación. Esto incluye coste de vehículos, tarifas de tren y barco, beneficios de intermediarios, etc. Los datos recogidos pertenecen a fuentes oficiales del estado o han sido proporcionados directamente por el actor intermodal correspondiente.

3.1. Transporte por carretera

El Ministerio de Fomento español publica anualmente un informe (Ministerio Fomento, 2007)

para las compañías de transporte por carretera. Esta publicación contiene datos sobre costes medios relativos a diferentes conceptos en el transporte por carretera. Un ejemplo de este tipo de datos se muestra en la Tabla 3. Los datos de costes han sido trasladados a precios añadiéndole el margen comercial del sector.

| | COSTES DIRECTOS ANUALES | |
|---|-------------------------|------------------|
| | Euros (€) | Distribución (%) |
| Costes directos | 94.510,23 | 100,0 |
| Costes por tiempo | 55.059,31 | 58,3 |
| Amortización del vehículo | 9.587,73 | 10,1 |
| Financiación del vehículo | 1.683,87 | 1,8 |
| Personal de conducción | 28.322,25 | 27,6 |
| Seguros | 6.414,73 | 6,8 |
| Costes fiscales | 870,73 | 0,9 |
| Dietas | 10.180,00 | 10,6 |
| Costes kilométricos | 39.456,92 | 41,7 |
| Combustible | 29.086,30 | 31,4 |
| Neumáticos | 5.086,50 | 6,0 |
| Mantenimiento | 1.650,00 | 1,7 |
| Reparaciones | 2.480,00 | 2,6 |
| kilometraje anual (km / año) | 100.000 | |
| kilometraje anual en carga (km / año) | 85.000 | |
| Costes Directos (euros / km recorrido) | 0,945 | |
| Costes Directos (euros / km cargado) | 1,112 | |

Tabla 3. Datos del Coste medio para un vehículo articulado porta-contenedores (420 CV, MMA=40.000 Kg., Carga útil= 26.250 kg., número de ejes=6, número de neumáticos=14) Bajo la hipótesis: 100.000 Km. recorridos anualmente, recorridos en carga superior a 200Km, 85% factor de carga, consumo medio 38.5 l / 100 Km.

3.2. Transporte por ferrocarril

Cada año la compañía Renfe ofrece a sus clientes las tarifas dependiendo de las terminales de origen y destino. Las tarifas para los trayectos enviados desde Sevilla se muestran en la Tabla 4, a modo de ejemplo.

Además de estos precios, los clientes deben pagar a Renfe por servicios adicionales (trayectos por carretera, almacenaje, etc.). En la Tabla 5 se muestra la tarifa de acarreo.

Tabla 4. Tarifas de la terminal Intermodal de Sevilla para el envío de contenedores sobre trenes RENFE
(Fuente: RENFE, Tarifa Intermodal Multicliente)

| DESTINOS | CONTENEDORES VACÍOS | | | | CONTENEDORES CARGADOS | | | |
|------------------------|---------------------|--------|--------|--------|-----------------------|----------------|--------|--------|
| | 20' | 30' | 40' | 45' | 20' <20,5Tm | 30' <29,5Tm | 40' | 45' |
| A CORUÑA S.D. | 316,79 | 346,60 | 372,69 | 428,59 | 372,69 | 407,77 | 438,46 | 504,23 |
| BARCELONA MORROT | 319,54 | 349,61 | 375,92 | 432,31 | 375,92 | 411,30 | 442,26 | 508,60 |
| BILBAO MERCANCÍAS | 280,33 | 306,72 | 329,80 | 379,27 | 329,80 | 360,84 | 388,00 | 446,20 |
| IRUN | 297,46 | 325,45 | 349,95 | 402,44 | 349,95 | 382,89 | 411,71 | 473,46 |
| JUNDIZ | 247,88 | 271,21 | 291,63 | 335,37 | 291,63 | 319,07 | 343,09 | 394,55 |
| LEON | 222,11 | 243,01 | 261,30 | 300,50 | 261,30 | 285,90 | 307,42 | 353,53 |
| LUGO | 341,22 | 373,33 | 401,43 | 461,64 | 401,43 | 439,21 | 472,27 | 543,11 |
| MADRID ABRONIGAL | 189,41 | 207,24 | 222,84 | 256,26 | 222,84 | 243,81 | 262,16 | 301,49 |
| SILLA | 254,46 | 278,41 | 299,36 | 344,27 | 299,36 | 327,54 | 352,19 | 405,02 |
| TARRAGONA CONSTANTI | 314,37 | 343,95 | 369,84 | 425,32 | 369,84 | 404,65 | 435,11 | 500,37 |
| TORRELAVEGA | 293,63 | 321,27 | 345,45 | 397,27 | 345,45 | 377,97 | 406,41 | 467,38 |
| VIGO GUIXAR | 279,73 | 306,06 | 329,09 | 378,46 | 329,09 | 360,07 | 387,17 | 445,25 |
| ZARAGOZA | 259,30 | 283,70 | 305,06 | 350,82 | 305,06 | 333,77 | 358,89 | 412,73 |

Tabla 5. Tarifas de RENFE para servicios de acarreo

| Distancia a la Terminal | Tipo de contenedor | | | |
|----------------------------|------------------------|--------|--------|--------|
| | 20' | 30' | 40' | 45' |
| 0-10Km | 54.48 | 65.40 | 79.63 | 99.57 |
| 10-30Km | 73.01 | 87.04 | 103.93 | 129.90 |
| 30-50Km | 97.99 | 112.93 | 128.38 | 160.46 |
| 50-70Km | 118.09 | | | |
| | 141.20 | | | |
| | 151.30 | | | |
| | 189.14 | | | |
| 70-120Km | Precios a concertar | | | |

3.3. Transporte marítimo

Las tarifas para el transporte marítimo son negociadas entre el cliente y acarreador, incluyendo los cargos portuarios. Algunos de los conceptos tenidos en cuenta en los transportes marítimos son:

- El flete (BAS) como resultado del transporte marítimo y de los procedimientos previos asociados a la operativa del buque.
- Cargo por Manipulación en Terminal (Terminal Handling Charge, THC): corresponde al costo que aplica la terminal por el manipulación del contenedor e incluye el movimiento barco / terminal y viceversa (depende de la condición del flete).
- Factor de Ajuste de Combustible (Bunker Adjustment Factor, BAF): recargo en base al costo del combustible en el mercado internacional.
- Factor de Ajuste Monetario (Currency Adjustment Factor, CAF): se aplica cuando el dólar

sufre variaciones en relación a otras monedas internacionales.

- Recargo por Carga Peligrosa / Hazardous Cargo Surcharge (HCS).

3.4. Actores adicionales

Los diferentes trayectos en el transporte intermodal pueden ser gestionados directamente por el cargador, contactando directamente con operadores y organizando el transporte y las operaciones de almacenamiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos estas operaciones requieren demasiado esfuerzo para pequeñas y medianas compañías. Por tanto, la opción preferida a veces es la subcontratación a diferentes actores (o actor) que manejaran el proceso entero. Los diferentes actores que participan en el proceso intermodal son:

- Cargador: persona o compañía que confía a terceros (agencia, transitorio, operador de transportes, transportista) el “cuidado” de las mercancías hasta ser entregadas al destinatario.
- Destinatario: persona responsable de recoger la mercancía.
- Transportista: compañía o persona responsable del movimiento de mercancías, ya sea directamente o a través de una tercera parte.
- Subcontratista: tercera parte a la que el transportista ha encargado la ejecución de un trayecto del transporte.
- Armador: propietario real de una buque. Puede hacer uso del buque para su propio beneficio o alquilarlo para un uso externo.
- Fletador: persona física o jurídica que alquila (fleta) un buque para su explotación, en la manera que estime conveniente.
- Agente marítimo o consignatario: responsable del armador o del fletador del buque en el puerto. Realiza todas las gestiones necesarias para el despacho documental frente a las autoridades locales, da atención a la tripulación y al buque, así como los suministros que precisen.
- Estibador: empresa o persona que realiza las operaciones de manipulación de la mercancía en tierra. Se encarga de la carga y descarga los buques.
- Transitario: es el intermediario que toma las disposiciones necesarias y/o proporciona servicios complementarios para el transporte de mercancías y otros servicios en representación del emisor. Coordina y organiza todas las operaciones del transporte, tratando las mercancías como si fuera su dueño.

4. Modelo

La cadena intermodal conecta un origen y un destino a través de una serie de enlaces. Entre estos enlaces existen una serie de nodos, algunos de los cuales son nodos de decisión. Decisiones tomadas en el sentido de elección del modo de transporte y actor implicado en el siguiente enlace.

Todo lo expuesto con anterioridad se modelará considerado un grafo, $G = (N, A)$, donde los

nodos representas distintos orígenes, destinos y/o estaciones intermodales. Un envío intermodal podrá ser efectuado entre un origen, $o \in N$, y un destino, $d \in N$, directamente o a través de distintas terminales intermodales (ver Figura 2). Cada enlace tiene un coste fijo, f_{ijk} , y un coste variable dependiendo del flujo que mercancías que se envíe, c_{ijk} . Los distintos enlaces tendrán una capacidad máxima de operación, Q_{ijk} .

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (f_{ijk} y_{ijk} + c_{ijk} x_{ijk}) \tag{1}$$

s.a.

$$\sum_{m \in D(j)} \sum_{k \in K} x_{jmk} - \sum_{n \in P(j)} \sum_{k \in K} x_{njk} = \begin{cases} \gamma & \text{si } j = o \\ 0 & \text{si } j \neq o, j \neq d \\ -\gamma & \text{si } j = d \end{cases} \quad \forall j \in N \tag{2}$$

$$x_{ijk} \leq Q_{ijk} \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall k \in K \tag{3}$$

$$x_{ijk} \leq M \cdot y_{ijk} \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall k \in K \tag{4}$$

El objetivo del modelo (1) es enviar un flujo de mercancía γ a coste mínimo. En cada trayecto, la mercancía puede ser mandada a través de diferentes modos de transportes, $k \in K$. El coste a través de una determinada ruta será la suma de los costes fijos de los distintos enlaces que están operativos, y_{ijk} , más los costes variables de los enlaces por el flujo que los atraviesa, x_{ijk} .

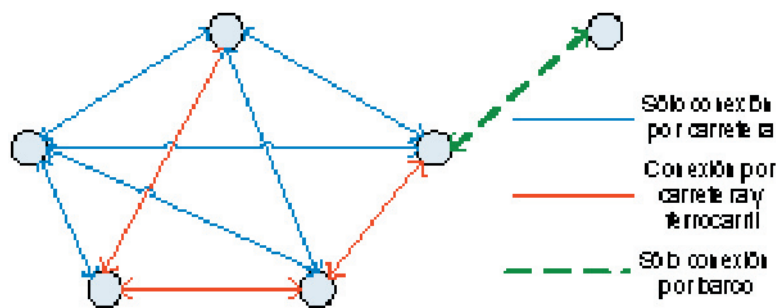


Figura 2. Ejemplo de red intermodal

El modelo está sujeto a una serie de restricciones. La ecuación (2) es una ecuación de continuidad ($D(j)$ son los descendientes del nodo j , y $P(j)$ son los antecesores del nodo j), donde se impone que todo el material que entra en un nodo sale de él al menos que éste sea el origen o destino de la carga. La ecuación (3) es una restricción de capacidad, impidiendo que pase por un enlace más flujo que la capacidad del mismo. Esta capacidad permitirá modelar la existencia o no de un determinado modo de transporte; la no existencia de un modo de transporte en un enlace se asimila a asignarle capacidad cero. En la ecuación (4) M es un número de valor muy elevado, obligando de esta manera a que si pasa flujo por el enlace (i, j) este esté abierto.

Como en el caso del transporte intermodal también se incurren gastos en los nodos, será necesario transformar los nodos en arcos a la hora de caracterizar la red (Figura 3). Cada nodo se desagregara en tantos nodos virtuales como enlaces tenga con el resto de nodos de la red, y entre cada par de nodos virtuales existirá un enlace virtual, que determinará el coste interior en

el nodo (terminal). De este modo, se puede caracterizar los distintos gastos de transbordo; en el caso de que no exista transbordo de ningún tipo, el enlace virtual entre el par de nodos virtuales tomará un coste cero (ver enlace g de la Figura 3). Puede darse el caso que el modo de entrada y de salida del nodo sea exactamente idéntico, pero sí se realice transbordo; por ejemplo, el transbordo entre trenes (ver enlace c de la Figura 3).

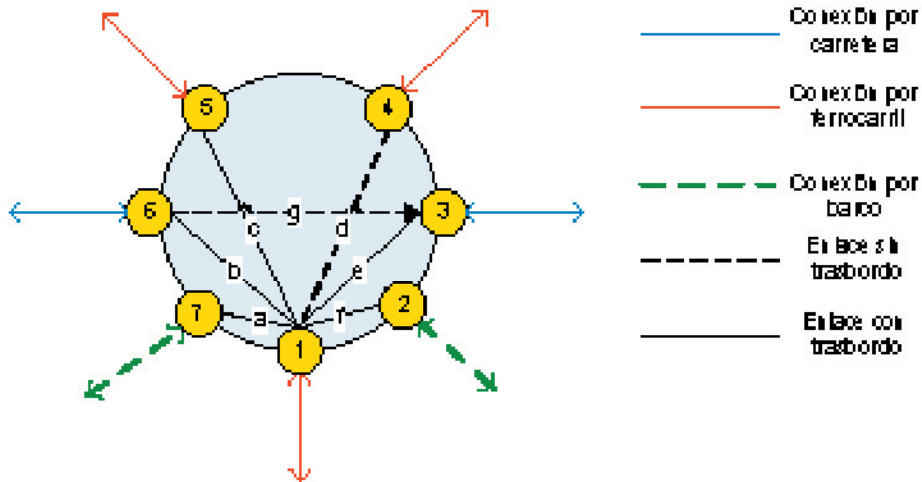


Figura 3. Nodo de la red intermodal desagregado.

Los modos de transporte considerados en el modelo son el ferrocarril, la carretera y el barco; el aire será excluido debido a que tiene características totalmente diferentes en el transporte de mercancías, y rara vez se muestra competitivo con el resto de modos. Los operadores logísticos considerados serán: las empresas de transporte, el transitario, el operador de ferrocarril (RENFE), la naviera.

El modelo desarrollado mira la efectividad del transporte intermodal atendiendo a costes. La resolución del modelo es similar a la del problema del camino mínima con costes fijos. Para facilitar esta resolución, se desarrollaron tres árboles de ayuda a la decisión, cuyo principal objetivo era presentar todas las posibles alternativas que existen a la hora de realizar el transporte intermodal. Los tres árboles implementados corresponden con los tres actores que pueden llegar a tomar decisiones en la construcción de la cadena intermodal:

- El cargador.
- El transitario.
- La empresa de transportes.

En cada árbol, se muestran las diferentes opciones que se le pueden presentar al actor implicado. Por ejemplo; en el caso del cargador, este puede subcontratar las operaciones de transporte o llevarlas a cabo el mismo. En el caso de subcontratarlo, el proceso depende de las conexiones por mar, tierra y aire existentes entre el origen y el destino. Para cada caso, el cargador necesita decidir entre las diferentes opciones de cada trayecto. En la figura 3 se muestra la estructura del modelo de ayuda a la decisión para el cargador de transporte intermodal.

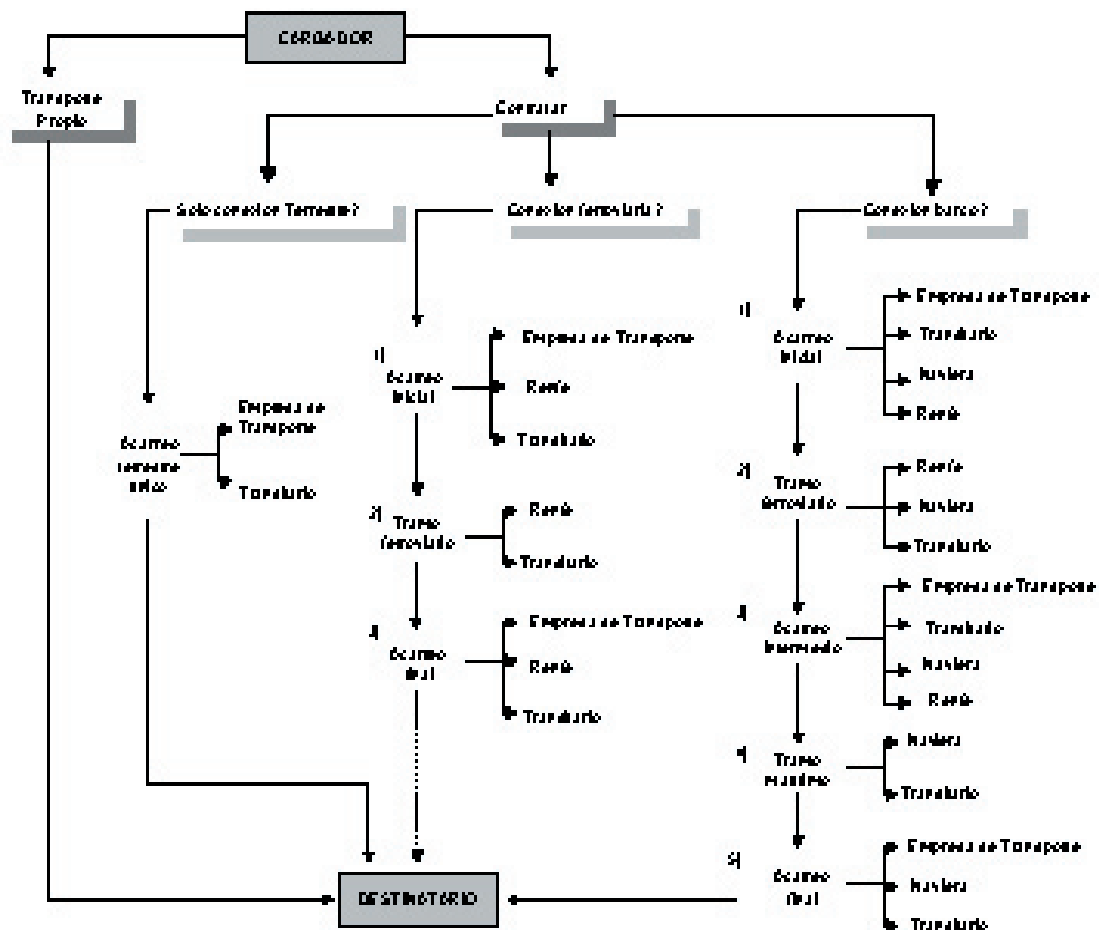


Figura 3. El proceso de toma de decisión para un cargador de la cadena intermodal.

5. Resultados

A modo de ejemplo, este modelo ha sido utilizado para el análisis de rutas de transporte desde Sevilla al resto de España, y dependiendo de la localización de la terminal intermodal sobre el territorio nacional y la distancia de esa terminal a Sevilla, es posible determinar qué opción de transporte es más barata.

Los resultados obtenidos confirman que el transporte intermodal de mercancías sólo es rentable a partir de los 500 Km. Para el caso del transporte de mercancías desde Sevilla al Levante español, es preferido el uso de transporte por carretera debido a la existencia de grandes autopistas por la costa, mientras que el transporte por ferrocarril tiene que pasar por Madrid. Otro hecho significativo, es que el transporte marítimo sólo es el modo más conveniente en el caso que no existe ninguna otra opción, aunque es la segunda opción más económica para la comunicación con el norte de España.

Todo lo expuesto anteriormente lleva a concluir que, si se quiere hacer del transporte intermodal una realidad palpable, es necesaria una inversión tanto para la mejora de la red ferroviaria española, como para la mejora de las infraestructuras de transferencias entre modos. A modo de ejemplo, señalar la necesidad de creación de un corredor férreo Andalucía-Levante.

Pese a la no muy favorable situación que presenta en estos momentos la red de transportes de mercancías por ferrocarril, la ya antes mencionada liberación del mercado y el proyecto de creación de una red nacional con ancho de vías internacional pueden crear un nuevo escenario

en términos de intermodalidad.

Referencias

Comisión Europea (2001). Libro Blanco del Transporte. Bruselas.

Dirección General de Programación Económica, (2005). Encuesta Permanente de Transportes de Mercancías por Carretera (EPTMC), Ministerio de Fomento.

Fowkes, A.S.; Nash, C.A.; Tweddle, G. (1991). Investigating the market for inter-modal freight technologies, *Transportation Research, Part A: General*, vol. 25 A, no. 4, pp. 161-172.

Macharis, C.; Bontekoning, Y.M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal Of Operational Research* 153 (2), 400-416.

Ministerio de Fomento, (2007). Observatorio de mercado del transporte de mercancías por carreteras. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica.

Morlok, E.K; Spasovic, L.N. (1994). Redesigning rail-truck intermodal drayage operations for enhanced service and cost performance, *Journal of Transportation Research Forum*, vol. 34, no. 1, pp. 16-31.

Niérat, P. (1997). Market area of rail-truck terminals: Pertinence of the spatial theory, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 31, no. 2, pp. 109-127.

Observatoire des politiques et des stratégies de transport en Europe, (2005). Dossier n°7: Le transport intermodal en Europe, Conseil National des Transports (CNT).