

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Máster en Modelización Matemática,  
Estadística y Computación

Proyecto Fin de Máster

# Modelo Biobjetivo de Localización de Depósitos de Contenedores Vacíos

**Autor:** Antonio Palacio Muñiz

**Tutor:** César Luis Alonso González

**Tutor:** Belarmino Adenso Díaz Fernández

28 de junio de 2012



# Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a mi director Adenso Díaz por darme la oportunidad de trabajar con él y por la gran cantidad de horas que me ha dedicado.

Me gustaría agradecer también a César Luis Alonso González por acceder a ser mi tutor en este trabajo y facilitarme el camino hasta su presentación.

También quiero agradecer a la Fundación Valenciaport su colaboración en este proyecto.

Por último, pero no por ello menos importante, quiero darle las gracias a mi madre y a mi novia, por aguantarme en estas últimas semanas tan estresantes y estar a mi lado apoyándome cuando más lo necesitaba.

Sinceramente.....

Antonio



# Índice general

<b>Prólogo</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Transporte marítimo de contenedores . . . . .	1
1.2. Depósitos de contenedores . . . . .	2
1.2.1. Distribución en planta de los depósitos . . . . .	3
1.2.2. Capacidad de un depósito . . . . .	4
1.3. Impacto medioambiental de las operaciones de transporte . . . . .	5
1.3.1. Congestión de tráfico . . . . .	6
1.3.2. Accidentabilidad . . . . .	6
1.3.3. Contaminación atmosférica . . . . .	6
1.3.4. Contaminación acústica . . . . .	7
1.3.5. Contaminación visual . . . . .	7
1.4. Puerto de Valencia . . . . .	7
1.5. Problema abordado . . . . .	9
<b>2. Conceptos metodológicos generales</b>	<b>11</b>
2.1. Optimización multiobjetivo . . . . .	11
2.1.1. Optimalidad de Pareto . . . . .	12
2.1.2. Eficiencia y Dominancia . . . . .	12
2.1.3. Métodos de resolución . . . . .	13
2.2. Analytic Hierarchy Process . . . . .	14

---

<b>3. Modelización del problema</b>	<b>25</b>
3.1. Revisión de literatura . . . . .	25
3.2. Modelo . . . . .	26
<b>4. Caso de aplicación: hinterland del puerto de Valencia</b>	<b>33</b>
4.1. Toma de datos . . . . .	33
4.1.1. Clientes . . . . .	33
4.1.2. Depósitos . . . . .	33
4.1.3. Terminales . . . . .	35
4.1.4. Costes . . . . .	35
4.1.5. Impacto . . . . .	36
4.2. Resultados experimentales . . . . .	40
4.3. Discusión . . . . .	43
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>45</b>
<b>Apéndices</b>	<b>51</b>
<b>A. Tabla de resultados en el cálculo de la frontera eficiente</b>	<b>53</b>
<b>B. Localización geográfica de depósitos</b>	<b>59</b>
<b>C. Código de LINGO</b>	<b>63</b>

# Índice de tablas

1.1. Tráfico de contenedores . . . . .	9
2.1. Escala de medidas . . . . .	16
2.2. Índices calculados por Saaty . . . . .	16
3.1. Parámetros del modelo . . . . .	27
3.2. Variables del modelo . . . . .	27
4.1. Impacto por unidad de flujo en cada depósito . . . . .	39
4.2. Solución inicial . . . . .	40
4.3. Solución actual . . . . .	43
A.1. Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada. . . . .	53
A.1. Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada. . . . .	54
A.1. Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada. . . . .	55
A.1. Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada. . . . .	56
A.1. Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada. . . . .	57



# Índice de figuras

1.1. Imagen del buque IDEAL X . . . . .	1
1.2. Zona de almacenamiento . . . . .	3
1.3. Inspección de contenedores . . . . .	3
1.4. Taller de reparación . . . . .	4
1.5. Lavado de contenedores . . . . .	4
1.6. Tecnologías de manipulación frontal y lateral . . . . .	5
1.7. Puertos de Valencia, Sagunto y Gandía . . . . .	8
2.1. Niveles de un AHP . . . . .	15
4.1. Ubicación de los depósitos: existentes (izda.) y potenciales (dcha.) . . . . .	35
4.2. Solución inicial (depósitos abiertos en negro) . . . . .	40
4.3. Representación gráfica de los experimentos . . . . .	41
4.4. Representación gráfica de los experimentos para cada solución (S1-S9) . . . . .	42
4.5. Distribución geográfica de los depósitos actuales . . . . .	43
4.6. Representación de la solución actual (A) frente a la frontera de Pareto obtenida . . . . .	44
B.1. Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S1 y S2 . . . . .	59
B.2. Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S3 y S4 . . . . .	60
B.3. Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S5 y S6 . . . . .	60
B.4. Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S7 y S8 . . . . .	61
B.5. Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en la solución S9 . . . . .	61



# Prólogo

Los contenedores son una herramienta básica para las operaciones logísticas marítimas. Una vez que los contenedores son descargados de los barcos, éstos han de ser almacenados en el terminal del puerto o en un depósito, esperando para ser transportados cuando sea necesario a un cliente que los volverá a utilizar para enviar su mercancía. La localización de los depósitos para dichos contenedores tiene un impacto tanto sobre los costes logísticos como también en el medioambiente de la zona en la que están situados, debido a la gran cantidad de tráfico que generan los traslados. En este proyecto, se propone un modelo bicriterio para diseñar una red de depósitos en un hinterland teniendo en cuenta tanto el objetivo de reducción de costes como el de impacto medioambiental. Los resultados, se aplican al caso del Puerto de Valencia.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Transporte marítimo de contenedores

El transporte marítimo de mercancías en contenedor surge a mediados del Siglo XX en Estados Unidos. Para reducir la manipulación de la carga, durante la II Guerra Mundial se pone en práctica la idea de transportar camiones en barcos y a principios de los años cincuenta Malcom Purcell McLean, conocido como “el padre de la contenerización” decide intentar comercializarla. Sin embargo, la cantidad de espacio de carga que se perdía al embarcar los camiones hacía del transporte de camiones una idea ineficiente. McLean, modificó entonces su idea original, separando las cajas de los camiones de los chasis [1]. Así, las cajas eran llenadas, se precintaban y eran transportadas por carretera hasta ser depositadas sobre la cubierta de los buques. Cuando los buques llegaban a su destino, las cajas se cargaban nuevamente sobre camiones y eran transportadas hasta su receptor. El 26 de Abril de 1956, el buque IDEAL X (Figura 1.1), considerado como el primer buque portacontenedores, partió del puerto Newark-Elizabeth, Nueva Jersey, con destino al puerto de Houston cargando 58 contenedores de 35 pies (11 metros), surgiendo así el concepto de la contenerización y el transporte multimodal puerta a puerta [2].



Figura 1.1: Imagen del buque IDEAL X

Durante la primera década del Siglo XXI, el transporte marítimo de contenedores ha sufrido un importante crecimiento tanto a nivel nacional como internacional, debido en gran medida a la heterogeneidad de este tipo de transporte. Los puertos, compiten por convertirse en puertos *hub*

(puerto central o de redistribución de carga) con el fin de que lleguen a ellos los buques de grandes dimensiones (que aportan mayores beneficios), descarguen sus mercancías y se redistribuyan en líneas de recorrido más corto. Es por ello que surge el problema del almacenamiento de los contenedores una vez que la mercancía es descargada, ya que, en general, como ocurre en la mayoría de países europeos el nivel de importación es mayor que el de exportación.

## 1.2. Depósitos de contenedores

Los depósitos de contenedores o depots tienen como función principal el almacenamiento temporal de los contenedores tras haber sido descargados en las instalaciones de los clientes, aunque también se realizan en ellos otros tipos de actividades como la inspección, reparación y limpieza de los mismos. Se pueden definir los depósitos como centros de estacionamiento de contenedores vacíos donde la unidad ingresa después de haber sido utilizada y permanece a la espera de ser tomada nuevamente en un tráfico de exportación desde el lugar donde se encuentra.

Existen múltiples motivos que hacen necesario el almacenamiento de contenedores vacíos [3]:

- La flota de contenedores prácticamente duplica la capacidad total de los buques portacontenedores.
- La falta de equilibrio entre las operaciones de importación y exportación requiere el reposicionado de grandes cantidades de equipo utilizado en importación y exportación.
- La falta de equilibrio en el tipo de equipo empleado en importación y exportación.
- Las dificultades señaladas para realizar triangulaciones coordinando operaciones de importación y exportación, también requieren del almacenamiento de equipo una vez vacío hasta que vuelve a ser utilizado en una operación de *match back*<sup>1</sup>.
- La variabilidad en la carga y la imposibilidad de hacer coincidir en cantidad, lugar y tiempo la oferta con la demanda, requiere que las navieras y compañías de *leasing* dispongan de stock de equipo disponible para satisfacer la demanda de las diferentes áreas en las que operan.

La capacidad de almacenamiento de las terminales portuarias es limitada además de cara, lo que hace necesario el disponer de otros espacios diferentes para el almacenamiento de los contenedores. Además, los contenedores precisan de operaciones intermedias antes de ser reutilizados, como la inspección limpieza y/o reparación. Los depósitos de contenedores ofrecen generalmente estos servicios aprovechando el paso de los contenedores vacíos por sus instalaciones.

---

<sup>1</sup>En lugar de reposicionar el contenedor vacío, al hacer *match back* se busca una carga de exportación local para que el contenedor se envíe directamente de vuelta lleno.

### 1.2.1. Distribución en planta de los depósitos

Los depósitos de contenedores son, generalmente, grandes recintos de terreno ubicados en las proximidades de las zonas portuarias, divididos en varios espacios en los cuales se lleva a cabo una actividad concreta. Se distinguen las siguientes zonas:

- **Zona de almacenamiento:** Es la zona del depósito que más espacio ocupa. Es el lugar en el que se sitúan los contenedores que llegan al depósito. Esta zona está a su vez compuesta por pilas de almacenamiento, pasillos de acceso y zonas de carga y descarga (Figura 1.2).



Figura 1.2: Zona de almacenamiento

Los contenedores se apilan en varias alturas formando calles, las cuáles deben de tener las dimensiones adecuadas para que la maquinaria maniobre con facilidad. La altura de las pilas depende del tipo de maquinaria de la que se dispone y suele ser de entre 4 y 6 contenedores.

- **Zona de inspección:** En general, la primera tarea tras la recepción de un contenedor en las instalaciones del depósito es la inspección del mismo (Figura 1.3). Esta zona está a su vez compuesta por una zona de espera de camiones, puntos de descarga del contenedor de la plataforma del camión, puntos de inspección y puntos de espera hasta que son inspeccionados y zona de circulación de las máquinas para el posicionamiento de los contenedores.



Figura 1.3: Inspección de contenedores

- **Zona de reparación o taller:** Esta zona es un área cubierta (Figura 1.4) en la que se distinguen varios espacios de trabajo como son: almacén para material, zona de maquinaria fija, zona de posicionado de contenedores para su reparación, cabina de pintura y zona de maniobra para la maquinaria que interviene en esta operación.



Figura 1.4: Taller de reparación

- **Zona de limpieza:** En esta zona es donde se lleva a cabo el lavado del interior de los contenedores (Figura 1.5), así como su desinfección y secado. En general, el lavado consiste en una limpieza a presión realizada siguiendo unos protocolos normalizados. Por tanto, en dichas instalaciones tiene que haber agua fría y caliente, vapor y aire caliente, variando la forma de realizar dicho proceso en función del tipo de mercancía transportada y el tipo de contenedor. Esta zona, debe de tener una canalización para las aguas procedentes de esta operación, así como una instalación de reciclado de agua. Los residuos resultantes del lavado deben ser tratados en depuradoras de aguas residuales.



Figura 1.5: Lavado de contenedores

### 1.2.2. Capacidad de un depósito

Una de las características más importantes de un depósito es su capacidad de almacenamiento. Dicha capacidad no depende exclusivamente de la superficie disponible, sino de las tecnologías de manipulación que se emplean, la organización interna del depósito, la altura de apilado de los contenedores y otros factores.

Las tecnologías de manipulación empleados son dos: Los sistemas de manipulación lateral y los sistemas de manipulación frontal (Figura 1.6).

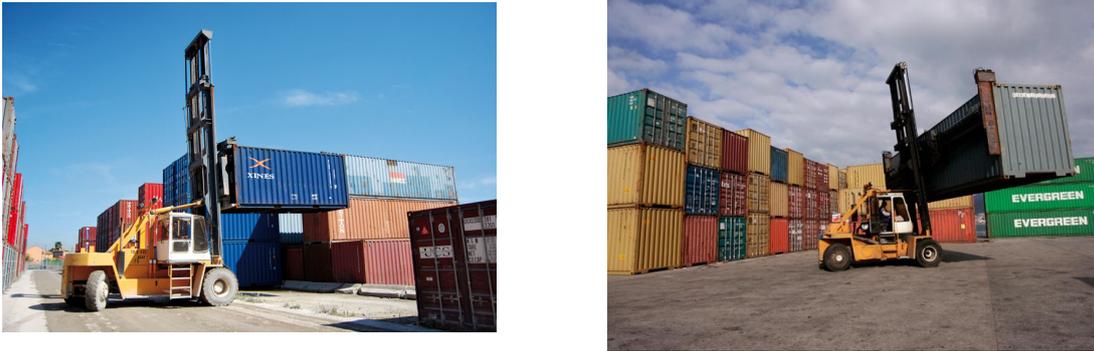


Figura 1.6: Tecnologías de manipulación frontal y lateral

El ancho de los pasillos que se forman entre las pilas dentro de la zona de almacenamiento está directamente relacionado con el tipo de manipulación utilizada. En el caso de la manipulación frontal, con unos 9 metros será suficiente para poder realizar la recepción y entrega sobre la plataforma del camión, mientras que en el caso de la manipulación lateral, los pasillos deben de ser de unos 15 metros de ancho aproximadamente.

La organización interna trata de minimizar el número de movimientos de una zona a otra del depósito para agilizar el proceso de entrega y la disponibilidad del equipo. Muchos depósitos poseen un sistema informático que permite el seguimiento del contenedor en todo momento para facilitar dicha tarea.

En cuanto a la altura de apilado, es un factor que viene determinado por condiciones externas (como la capacidad de elevación de la carretilla), limitaciones legales o urbanísticas.

### 1.3. Impacto medioambiental de las operaciones de transporte

Se denomina impacto medioambiental a cualquier cambio o modificación en el medio con efectos negativos o positivos producido como consecuencia de las actividades, productos y servicios de una organización. Uno de los principales generadores del impacto ambiental es el transporte debido entre otros factores a las emisiones de  $NO_x$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , etc. . . producidas por la combustión de derivados del petróleo que provocan el efecto invernadero, efectos sobre la salud y los ecosistemas, agotamiento del ozono, etc. . .

Los depósitos de contenedores debido a la cantidad de movimientos de camiones diarios que realizan, generan una gran cantidad de tráfico. Éste es uno de los principales motivos por los que los depósitos de contenedores son grandes generadores de impacto medioambiental.

A continuación se describen las principales externalidades generadas por el transporte por carretera.

### 1.3.1. Congestión de tráfico

La congestión del tráfico en horas punta, con la enorme pérdida de horas en los atascos y el consiguiente despilfarro de recursos, constituye una de las principales externalidades del transporte. Estudios recientes [4] señalan que los períodos considerados como de tráfico congestionado son cada vez más prolongados y que las velocidades medias se han reducido a lo largo de los últimos 20 años en, al menos, un 10 %.

### 1.3.2. Accidentabilidad

Según datos de la Organización Mundial de la Salud [5], los traumatismos causados por el tránsito son uno de los principales problemas de salud pública, pues provocan más de 1,2 millones de muertes cada año. En España, las cifras crecen a un ritmo imparable, destacando en cifras absolutas por encima de la del resto de países de Europa.

Además del sufrimiento humano producido a las víctimas y a sus familiares, esta siniestralidad produce asimismo un costo económico a la sociedad que cabría incluir dentro de los costes no imputados al transporte. En cuanto a los costes por víctima, se incluyen:

- Los costes médicos, de primeros auxilios, tratamiento, prótesis y las atenciones no médicas de adaptación de discapacitados.
- La pérdida de capacidad productiva.
- Otros costos económicos (desplazamientos familiares, funerales, ayudas.).
- Los costes humanos de las víctimas y familiares.

Por lo que respecta a los costes por accidente, se incluyen:

- Los daños a la propiedad, incluyendo los daños al vehículo, a edificios, a la carga, y el medioambiental.
- Los costes administrativos (policía, bomberos, compañías de seguros, juicios).

### 1.3.3. Contaminación atmosférica

Se estima que el transporte mediante automóvil y camión es actualmente la principal fuente de emisiones de productos contaminantes a la atmósfera [4]. Entre el 70 y el 80 % de las ciudades europeas de más de un millón de habitantes presentan niveles de contaminante atmosféricos que exceden en ocasiones los niveles aconsejados por la Organización Mundial de la Salud.

Entre las emisiones atmosféricas producidas por el transporte, cabe distinguir entre los gases que contribuyen a la modificación del clima mundial, como los que propician el efecto invernadero (clorofluorcarburos, dióxido de carbono...), aquellos de efecto regional, como los compuestos

volátiles y los óxidos de nitrógeno y de azufre, que contribuyen a las lluvias ácidas y a la creación de ozono troposférico, y otros que afectan fundamentalmente al medio ambiente local, como el monóxido de carbono y el plomo, o la emisión de partículas, que provocan o agravan enfermedades respiratorias, alérgicas o cancerosas.

#### 1.3.4. Contaminación acústica

Según recientes estudios efectuados para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) [4], más del 20 % de la población de la Unión Europea, cerca de 80 millones de personas, está expuesta a niveles de ruido de una intensidad superior a la aceptable (65 dB(A)) a causa de la circulación de vehículos, mientras que otros 170 millones de personas están expuestas a un nivel molesto (entre 55 y 65 dB(A)).

A pesar de las diversas mejoras técnicas en los vehículos y en los firmes, y de las medidas de carácter correctivo (pantallas acústicas, etc. . . ), los niveles de ruido no han descendido en las últimas décadas, debido al constante aumento tanto del número de vehículos como de la movilidad.

#### 1.3.5. Contaminación visual

La contaminación visual es un tipo de contaminación que parte de todo aquello que afecte o perturbe la visualización o rompan la estética de una zona o paisaje, y que puede incluso llegar a afectar a la salud de los individuos o zona donde se produzca el impacto ambiental.

Se refiere al abuso de ciertos elementos "no arquitectónicos" que alteran la estética, la imagen del paisaje tanto rural como urbano, y que generan, a menudo, una sobreestimulación visual agresiva, invasiva y simultánea.

Los depósitos de contenedores generan entre 200 y 500 (dependiendo del tamaño del depósito) movimientos diarios de transporte pesado lo que altera gravemente la imagen estética de la zona en la que están situados.

### 1.4. Puerto de Valencia

El Puerto de Valencia, es uno de los tres puertos que comprende Valenciaport, junto a los puertos de Sagunto y Gandía (Figura 1.7).

Valenciaport es el puerto líder del Mediterráneo en tráfico comercial, fundamentalmente de mercancías en contenedor, gracias sobre todo a un área de influencia dinámica y a una extensa red de conexiones regulares con los principales puertos del mundo. Por ello, Valenciaport es no sólo elemento clave en la proyección exterior de la Comunidad Valenciana, sino también la puerta marítima de producción y consumo de toda la Península Ibérica, siendo el puerto natural de Madrid y Zona Centro.

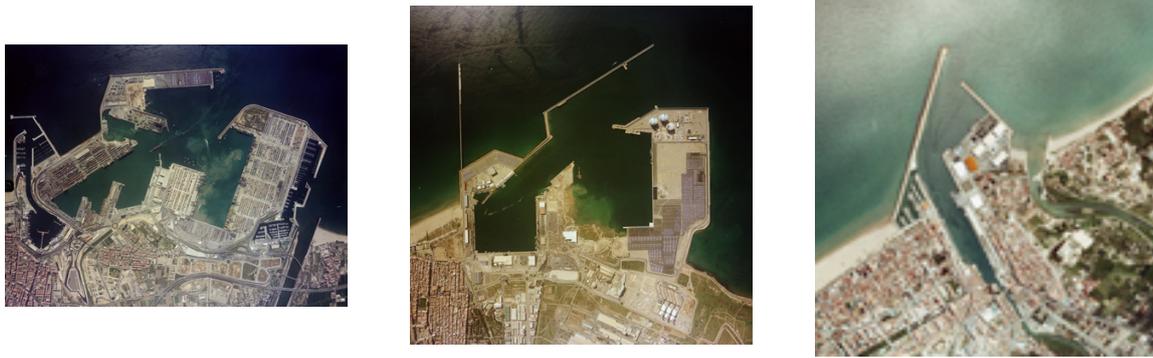


Figura 1.7: Puertos de Valencia, Sagunto y Gandía

Este liderazgo se sustenta en:

- Una ubicación privilegiada en el centro del arco mediterráneo occidental, en línea con el corredor marítimo este-oeste que atraviesa el Canal de Suez y el Estrecho de Gibraltar, lo que posiciona a Valenciaport como primera y última escala de las principales compañías marítimas de línea regular entre América, Cuenca Mediterránea y Lejano Oriente.
- Unas infraestructuras marítimo-portuarias de última generación. Valenciaport dispone de instalaciones especializadas de alto rendimiento para todo tipo de tráfico (graneles líquidos, graneles sólidos, mercancía general convencional, mercancía general containerizada y pasajeros).
- Una gestión permanentemente orientada hacia la innovación en los diversos campos: tecnologías de la información, calidad de servicio, desarrollo sostenible, formación de la Comunidad Portuaria, etc...

El puerto de Valencia se encuentra al este de la ciudad, limitando al norte con las playas las Arenas y la Malvarrosa. Al sur se encuentra la nueva terminal y la Zona de Actividades Logísticas (ZAL), limitando con el puerto deportivo junto al nuevo cauce del río Turia en Pinedo. El acceso sur al puerto se realiza por la V-30 Circunvalación de Valencia, donde empieza o acaba la autovía.

La superficie total de la ZAL del Puerto de Valencia es de  $683.232 m^2$  con la siguiente distribución de espacios [6]:

1. Área logística:  $309865 m^2$ .
2. Red viaria:  $181140 m^2$ .
3. Zonas verdes y equipamientos:  $127062 m^2$ .
4. Otros usos:  $33672 m^2$ .
5. Uso terciario y servicios:  $31493 m^2$ .

En cuanto a las mercancías en contenedor, el número de TEU (*Twenty Feet Equivalent Unit*<sup>2</sup>) creció en 2010 un 15,14% respecto al año anterior, alcanzando la cifra histórica de 4206937 TEU. De estos, 1044423 TEU corresponden a carga, 1006963 TEU a descarga y 2155551 TEU a tránsito [6].

	2010	2009	Diferencia	%
Suma de unidades (contenedores)	2776910	2430204	346706	14,2
TEU	4206937	3653890	553047	15,1
Taras de contenedor	8615072	7404950	1210122	16,3

Tabla 1.1: Tráfico de contenedores

## 1.5. Problema abordado

En este trabajo se aborda el problema de diseñar una red de depósitos de contenedores en un hinterland. Como consecuencia de los aspectos que han sido descritos anteriormente, a la hora de diseñar dicha red de depósitos, resulta interesante abordar el problema de la localización desde un punto de vista no solo económico, sino también medioambiental. Dado que no se han encontrado trabajos previos en la literatura con este enfoque, en este proyecto se presenta un modelo biobjetivo de minimización de costes y minimización del impacto ambiental asociado al transporte inducido por dicha red logística.

Para probar el modelo resultante, se han utilizado datos de movimientos anuales de exportación e importación de contenedores de clientes de la Comunidad Valenciana y Murcia proporcionados por el Puerto de Valencia. Se dispone de distintas ubicaciones de depósitos existentes y se han propuesto nuevas posibles ubicaciones para los mismos teniendo en cuenta los puntos con mayor demanda de contenedores por parte de los clientes. Los costes de mantenimiento de los depósitos también han sido proporcionados por el Puerto de Valencia.

Dada la dificultad de disponer de datos asociados al segundo objetivo considerado, para el estudio del impacto ambiental asociado a las necesidades de transporte en las inmediaciones de los depósitos, se han tenido en cuenta las externalidades mencionadas previamente, diseñando un AHP a partir de la opinión de distintos expertos y potenciales vecinos de esas instalaciones. De esta manera, se ha cuantificado el impacto ambiental por unidad generado por cada uno de los depósitos, considerando los distintos niveles de cada externalidad en cada depósito proporcionados por un experto del Puerto de Valencia. Todos los cálculos y transformaciones necesarias se han realizado con MATLAB.

Una vez disponibles todos los datos, se ha resuelto el modelo de minimización biobjetivo utilizando el método de las  $\varepsilon$ -restricciones, utilizando como software de optimización LINGO.

---

<sup>2</sup>Representa la unidad de medida de la capacidad del transporte marítimo en contenedores. Un TEU es la capacidad de carga de un contenedor normalizado de 20 pies.



## Capítulo 2

# Conceptos metodológicos generales

### 2.1. Optimización multiobjetivo

Al proceso de optimización de forma sistemática y simultánea de una colección de funciones objetivo se le llama optimización multiobjetivo (*Multiobjective Optimization*, MOO).

La formulación general de un problema de optimización multiobjetivo es:

$$\begin{aligned} \min_x F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T \\ \text{sujeto a:} & \\ &\begin{cases} g_j(x) \leq 0, & j = 1, 2, \dots, m \\ h_l(x) = 0, & l = 1, 2, \dots, e \end{cases} \end{aligned} \tag{1}$$

donde  $k$  es el número de funciones objetivo,  $m$  es el número de restricciones de desigualdad y  $e$  es el número de restricciones de igualdad.  $x \in E^n$  es un vector de variables de decisión donde  $n$  es el número de variables independientes  $x_i$ .  $F(x) \in E^k$  es un vector de funciones objetivo  $F_i(x) : E^n \rightarrow E^1$ . El espacio de soluciones factibles es  $X = \{x \mid g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \wedge h_l(x) = 0, l = 1, 2, \dots, e\}$ . El conjunto alcanzable es  $Z = \{F(x) \mid x \in X\}$ .

La optimización multiobjetivo surgió originalmente a partir de tres áreas: el equilibrio económico y las teorías de bienestar, la teoría de juegos, y las matemáticas puras. En consecuencia, muchos términos e ideas fundamentales se derivan de estos campos. Vamos a definir algunos términos básicos. Muchos de estos términos tiene varias definiciones en la literatura que se derivan de las diferencias entre la ingeniería y la jerga económica. En tales casos, se utilizan las definiciones más comunes [7].

- *Preferencias*: Las preferencias son las opiniones de un decisor relativas a puntos en el conjunto alcanzable. Con los métodos que implican una articulación a posteriori de las preferencias, el decisor impone directamente las preferencias sobre un conjunto de potenciales puntos solución. Entonces, en teoría, la solución final refleja las preferencias del decisor con bastante precisión. Con una articulación a priori de preferencias, se deben cuantificar las opiniones antes de ver los puntos en el conjunto alcanzable. En este sentido, el término pre-

ferencia a menudo se utiliza en relación con la importancia relativa de diferentes funciones objetivo. Sin embargo, esta articulación de las preferencias se basa fundamentalmente en las opiniones sobre los puntos previstos en el conjunto alcanzable.

- *Función de preferencia*: Una función de preferencia es una función abstracta (de puntos en el conjunto alcanzable) en la mente del decisor, que contiene sus preferencias.
- *Función de utilidad*: En el contexto de la economía, utilidad, que se modela a través de una función de utilidad, representa el grado de satisfacción de un individuo o grupo [8]. En términos de optimización multiobjetivo, una función de utilidad individual se define para cada objetivo y representa la importancia relativa de dicho objetivo. La función de utilidad  $U$  es una fusión de las funciones de utilidad individuales y es una expresión matemática que trata de modelar las preferencias del decisor. Se utiliza para aproximar la función de preferencia, que normalmente no se puede expresar en forma matemática.
- *Criterio Global*: Un criterio global es una función escalar que combina matemáticamente funciones objetivo múltiples.

### 2.1.1. Optimalidad de Pareto

En contraste con la optimización de un solo objetivo, una solución a un problema multiobjetivo es más bien un concepto que una definición. Normalmente, no hay una solución global única, y con frecuencia es necesario para determinar un conjunto de puntos, que todos se ajustan a una definición predeterminada para un óptimo. El concepto predominante en la definición de un punto óptimo es el de Pareto óptimo [9], que se define como sigue:

**Definición 2.1.** *Un punto  $x^*$  es Pareto óptimo  $\Leftrightarrow \nexists x \in X / F(x) \leq F(x^*) \wedge F_i(x) < F_i(x^*)$  para alguna función  $F_i$ .*

Todos los puntos Pareto óptimos se encuentran en la frontera del espacio alcanzable  $Z$  [10, 11]. A menudo, los algoritmos proporcionan soluciones que pueden no ser Pareto óptimas pero que pueden satisfacer otros criterios, siendo significativas para aplicaciones prácticas. Un punto débilmente Pareto óptimo se define:

**Definición 2.2.** *Un punto  $x^*$  es débilmente Pareto óptimo  $\Leftrightarrow \nexists x \in X / F(x) < F(x^*)$ .*

Un punto es débilmente Pareto óptimo si no hay otro punto que mejore todas las funciones objetivo de forma simultánea. En contraste, un punto es Pareto óptimo si no hay otro punto que mejore al menos una función objetivo sin detrimento de otra. Los puntos Pareto óptimos son débilmente Pareto óptimos, pero no se verifica el recíproco.

### 2.1.2. Eficiencia y Dominancia

Eficiencia, que es la misma idea que admisibilidad o no inferioridad [12], es otro concepto primordial en optimización multiobjetivo, y se define del siguiente modo:

**Definición 2.3.** Un punto  $x^* \in X$  es eficiente  $\Leftrightarrow \nexists x \in X / F(x) \leq F(x^*) \wedge F_i(x) < F_i(x^*)$  para alguna función  $F_i$ . En otro caso,  $x^*$  es ineficiente.

**Definición 2.4.** El conjunto de todos los puntos eficientes se denomina frontera eficiente.

Steuer [12] también dio la siguiente definición para puntos dominados y no dominados:

**Definición 2.5.** Un vector de funciones objetivo  $F(x^*) \in Z$  es no dominado  $\Leftrightarrow \nexists F(x) \in Z / F(x) \leq F(x^*) \wedge F_i(x) < F_i(x^*)$  para alguna función  $F_i$ . En otro caso,  $F(x^*)$  es dominado.

Para fines prácticos, las definiciones 2.3 y 2.5 son iguales. Sin embargo, la eficiencia se refiere típicamente a un vector de variables en el espacio factible, mientras que la dominancia se refiere a un vector de funciones en el espacio alcanzable. La definición de óptimo de Pareto es similar a la de la eficiencia, y un punto óptimo de Pareto en el espacio alcanzable a menudo se considera el mismo que un punto no dominado.

### 2.1.3. Métodos de resolución

La solución de un problema de optimización multiobjetivo consta de dos etapas bien marcadas [13]: la optimización de varias funciones objetivo, y el proceso de decidir cuál es el equilibrio de objetivos adecuado desde el punto de vista del decisor. Existen múltiples métodos para la resolución de estos problemas [7]. Algunos de ellos son:

- *Global criterion method*: Es uno de los métodos generales más comunes de resolución de problemas de optimización multiobjetivo en el cuál, todas las funciones objetivo se combinan para formar una única función utilidad. Las funciones de utilidad más generales son:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i (F_i(x))^p, \quad F_i(x) > 0 \forall i. \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^k (w_i F_i(x))^p, \quad F_i(x) > 0 \forall i. \quad (3)$$

- *Weighted sum method*: Es la aproximación más común para la optimización multiobjetivo. Su función de utilidad es:

$$U = \sum_{i=1}^k w_i F_i(x). \quad (4)$$

que se puede observar es un caso particular de (2) y (3) con  $p = 1$ .

- *Método lexicográfico*: En este método, el decisor realiza una jerarquización (de mayor a menor importancia) de las funciones objetivo. Luego, la solución óptima al problema es obtenida minimizando cada función objetivo, comenzando por la de mayor importancia. El método obtiene un vector solución después de minimizar la función objetivo más importante, y ese vector es incorporado a la siguiente función objetivo como una restricción de

igualdad que se debe satisfacer. Una vez obtenida la solución para ese objetivo, se repite el proceso para la siguiente función en el orden de importancia. Su formulación sería la siguiente: Para cada  $i = 1, 2, \dots, k$ :

$$\begin{aligned} & \min_{x \in X} F_i(x) \\ & \text{s.a.} \\ & F_j(x) \leq F_j(x_j^*), \quad j = 1, 2, \dots, i-1, \quad i > 1 \end{aligned} \quad (5)$$

- *Exponential weighted criterion*: Athan y Papalambros [10] propusieron el *exponential weighted criterion* como solución a la incapacidad del *weighted sum method* para encontrar soluciones en porciones no convexas de la superficie óptima de Pareto. Su función de utilidad se define como:

$$U = \sum_{i=1}^k (e^{pw_i} - 1) e^{pF_i(x)} \quad (6)$$

- *Bounded objective function method*: Este método minimiza inicialmente la función objetivo considerada como más importante  $F_s(x)$ . Todas las demás funciones objetivo se usan como restricciones adicionales tales que  $l_i \leq F_i(x) \leq \varepsilon_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ ,  $i \neq s$  [14].  $l_i$  y  $\varepsilon_i$  son los límites inferior y superior respectivamente de la función objetivo  $F_i(x)$ .  $l_i$  no suele considerarse a menos que la intención sea la de lograr un objetivo o una caída dentro de un rango de valores para  $F_i(x)$ , en lugar de determinar un mínimo.

En 1971, Haimes [15] introdujo el método de las  $\varepsilon$ -constraints (también conocido como método de las  $e$ -constraints o *trade-off approach*), en el cual  $l_i$  no se considera. En este caso, una variación sistemática de  $\varepsilon_i$  produce un conjunto de soluciones Pareto óptimas [14]. No obstante, una mala selección de  $\varepsilon \in \mathbb{R}^k$  puede dar lugar a una formulación sin solución factible. Goicoechea [16], Cohon [17], Stadler [18] y Carmichael [19] presentan métodos para la selección de los valores de  $\varepsilon$  que reflejan preferencias.

Si existe, la solución a la formulación de las  $\varepsilon$ -constraints es débilmente Pareto óptima [20], y cualquier punto débilmente Pareto óptimo se puede obtener si la región factible es convexa y todas las funciones objetivo son explícitamente cuasi-convexas [21]. Si la solución es única, entonces es Pareto óptima [20]. Obviamente, la unicidad es muy difícil de verificar, aunque si el problema es convexo y  $F_s(x)$  es estrictamente convexa, entonces la solución es necesariamente única [22].

Existen otros muchos métodos como *goal programming*, *physical programming*, *normal boundary intersection (NBI) method*, *normal constraint (NC) method*, *algoritmos genéticos*, etc... que pueden ser consultados en [7].

## 2.2. Analytic Hierarchy Process

El proceso analítico jerárquico (*Analytic Hierarchy Process* (AHP) [23]) fue ideado por Thomas L. Saaty en los años 70 y desde entonces ha sido muy estudiado. Es un método de decisión para

priorizar alternativas cuando se consideran múltiples criterios. Este proceso permite al decisor estructurar problemas complejos de manera jerárquica o mediante distintos niveles. La jerarquía se construye de modo que los elementos de un mismo nivel sean del mismo orden de magnitud y pueda relacionarse con algunos o todos los elementos del siguiente nivel. En una jerarquía típica el nivel mas alto, focaliza el objetivo. Generalmente, la jerarquía tiene al menos tres niveles distintos: el objetivo, los criterios y las alternativas (Figura 2.1).

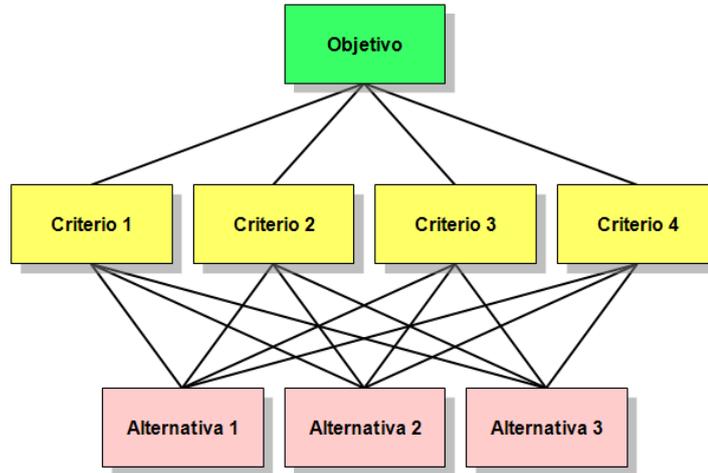
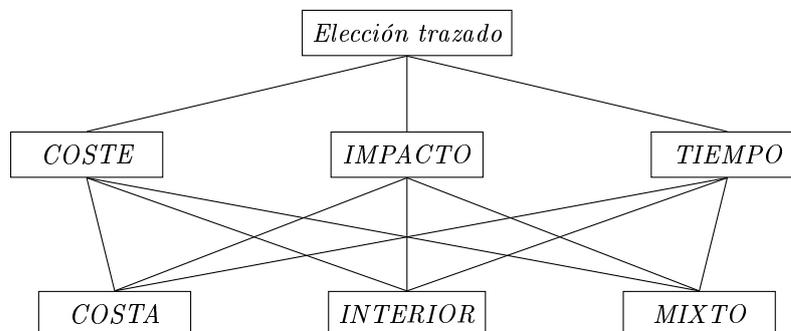


Figura 2.1: Niveles de un AHP

Los elementos influyentes en la decisión (objetivo), se representan en los niveles inmediatamente inferiores. El nivel mas bajo comprende las opciones de decisión. De esta manera se ilustra de un modo simple y claro todos los factores afectados por la decisión y sus relaciones.

**Ejemplo.**

*Supongamos que hay que elegir el trazado para una autopista de entre tres posibles: COSTA, INTERIOR, MIXTA. Existen tres criterios para identificar la mejor alternativa: COSTE, IMPACTO AMBIENTAL, TIEMPO DE EJECUCIÓN. La jerarquía de este problema sería la siguiente:*



El siguiente paso a realizar en esta metodología es la comparación de los criterios 2 a 2 para definir los pesos  $w_i$  asociados a cada uno de los mismos que reflejan la importancia relativa entre cada uno de ellos. Para ello, se construye una matriz  $M$  donde  $m_{ij} > 0 \forall i, j$ ,  $m_{ji} = \frac{1}{m_{ij}} \forall i, j$  y

$m_{ii} = 1 \forall i$ . Inicialmente, Saaty propuso unos valores  $m_{i,j} = \{1, 3, 5, 7, 9\}$  que determinaban la importancia del criterio  $i$  sobre el criterio  $j$  según la siguiente escala de medidas:

Valor	Descripción
1	Igual importancia.
3	Importancia moderada.
5	Importancia fuerte.
7	Importancia muy fuerte.
9	Importancia extremadamente fuerte.

Tabla 2.1: Escala de medidas

Los valores intermedios, proporcionan valores adicionales de discriminación.

### Ejemplo.

Una posible matriz que relacione los criterios en el primer nivel podría ser:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{coste} & \text{impacto} & \text{tiempo} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{coste} \\ \text{impacto} \\ \text{tiempo} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

donde se tendría que el coste sería ligeramente más importante que el impacto y fuertemente más importante que el tiempo, o que el impacto es moderadamente más importante que el tiempo.

Un tema importante a la hora de realizar estas matrices de comparación es la consistencia de las mismas. No se puede exigir una consistencia perfecta, pero sí que haya cierta consistencia en las valoraciones. Es decir, si  $i$  es más importante que  $j$  y  $j$  es más importante que  $k$ , no puede ser que  $k$  sea más importante que  $i$ . AHP ofrece un modo de medir estas discrepancias.

Supongamos que tenemos una matriz  $M$  de dimensión  $n \times n$  donde  $n$  es el número de criterios que se estudian. Sea el polinomio característico de dicha matriz  $p(\lambda) = |M - \lambda I|$ , y de sus valores propios sea  $\lambda_{max}$  el mayor valor propio real que hayamos obtenido. Saaty calculó empíricamente unos índices  $RI(n)$  (Tabla 2.2) para  $n > 2$  según los cuales una matriz  $M$  es aceptablemente consistente si  $RC = \frac{IC}{RI(n)} \leq 0,1$  donde  $IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ .

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI(n)	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tabla 2.2: Índices calculados por Saaty

Si  $M$  es perfectamente consistente, se tiene que  $\lambda_{max} = n$ , y en caso contrario,  $\lambda_{max} \geq n$ , siendo  $M$  más consistente cuanto más se acerque  $\lambda_{max}$  a  $n$ .

Una vez confirmada la consistencia de la matriz, se calcula el autovector asociado al valor propio que había sido escogido, se normaliza y esos serán los pesos  $w_i$  buscados.

**Ejemplo.**

Para el ejemplo anterior tenemos que:

$$p(\lambda) = |M - \lambda I| = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 - \lambda & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 - \lambda \end{vmatrix} = -\lambda^3 + 3\lambda^2 + \frac{1}{30} \Rightarrow \text{sólo una raíz real } \lambda = 3,0036695$$

Tenemos entonces que  $\lambda_{max} = 3,0036695$  por lo que podemos calcular el índice de consistencia de nuestra matriz.  $IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0,0018473 \leq 0,1$ , de modo que la matriz es consistente.

Se calcula entonces el autovector asociado:

$$\begin{pmatrix} -2,0036695 & 2 & 5 \\ 1/2 & -2,0036695 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & -2,0036695 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} w_1 &= 5,3133w_3 \\ \Rightarrow w_2 &= 2,8231w_3 \\ w_3 &= w_3 \end{aligned}$$

Normalizando este vector, obtenemos el valor de los pesos que se buscaba.

$$w_1 = \frac{5,3133}{\sum_{i=1}^3 w_i} = \frac{5,3133}{9,1364} = 0,5816$$

$$w_2 = \frac{2,8231}{\sum_{i=1}^3 w_i} = \frac{2,8231}{9,1364} = 0,3090$$

$$w_3 = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 w_i} = \frac{1}{9,1364} = 0,1095$$

En caso de que la matriz no sea consistente hay que identificar el elemento  $m_{ij}$  más “inconsistente” y corregirlo. Una vez corregido, se vuelve a chequear si la matriz es consistente. Este proceso, se repite hasta que se consiga que la matriz sea consistente. El procedimiento que se sigue para la modificación de nuestra matriz original es el siguiente:

- Se calcula la matriz  $M'$  para la que cada elemento es de la forma  $m'_{ij} = w_i/w_j$ .
- Se compara la matriz  $M$  con la matriz  $M'$  de manera que para cada elemento se halla el cociente  $m_{ij}/m'_{ij}$ .

- El elemento de los calculados anteriormente que más alejado esté del valor 1, es el elemento más “inconsistente”. Entonces, en la matriz original  $M$  se efectúa para ese elemento,  $m_{ij} = m_{ij} - 1$  si  $m_{ij}/m'_{ij} > 1$  o  $m_{ij} = m_{ij} + 1$  en otro caso.

### Ejemplo.

Supongamos que en el ejemplo anterior, la matriz  $M = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 1/4 & 1 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$

$$\Rightarrow p(\lambda) = -\lambda^3 + 3\lambda^2 + \frac{121}{80} \Rightarrow \lambda_{max} = 3,1522 \Rightarrow RC = 0,1312 > 0,1 \Rightarrow M \text{ no es consistente.}$$

Calculando el autovector asociado al  $\lambda$  obtenido tenemos que los pesos asociados a esta matriz son  $w_1 = 0,6648$ ,  $w_2 = 0,2449$ ,  $w_3 = 0,0902$ . Una vez obtenidos los pesos, calculamos la matriz  $M'$  y tenemos que:

$$M' = \begin{pmatrix} 1 & 2,7144 & 7,3681 \\ 0,3684 & 1 & 2,7144 \\ 0,1357 & 0,3684 & 1 \end{pmatrix}$$

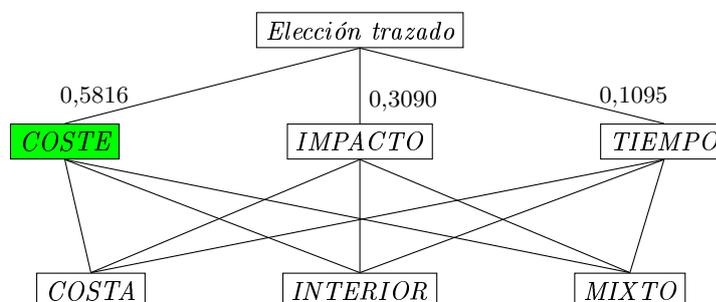
Realizamos el cociente  $M/M' = \begin{pmatrix} 1 & 1,4736 & 0,6786 \\ 0,6786 & 1 & 1,4736 \\ 1,4736 & 0,6786 & 1 \end{pmatrix}$ , como hay empate entre varios

valores, elegimos uno de ellos por ejemplo el elemento en la posición (2,3) y hacemos  $m_{23} = m_{23} - 1 = 3$  y en consecuencia  $m_{32} = 1/3$ . Así, nuestra nueva matriz  $M$  es  $M = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 1/4 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$  que es consistente.

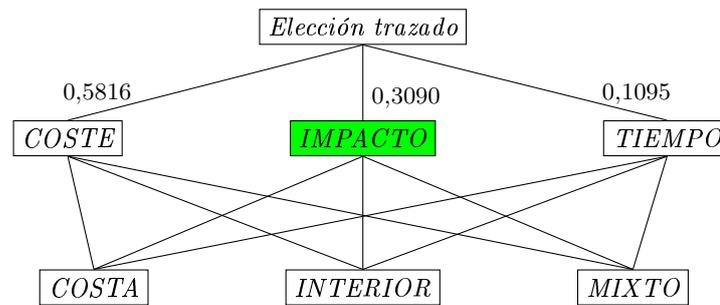
Una vez calculados los pesos del primer nivel, se calculan para el resto de los niveles hasta llegar al nivel último de las alternativas. El procedimiento, es el mismo que el efectuado para los criterios.

### Ejemplo.

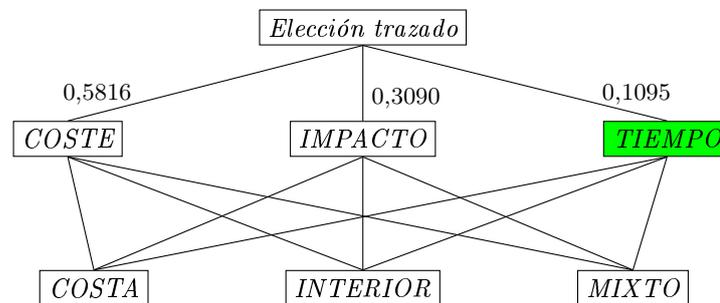
Veamos como sería en nuestro ejemplo cada matriz de alternativas en relación al criterio correspondiente.



$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 3 \\ 1/6 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^1 = \begin{pmatrix} 0,6667 \\ 0,1111 \\ 0,2222 \end{pmatrix}$$



$$M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1/9 & 1/5 \\ 9 & 1 & 2 \\ 5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^2 = \begin{pmatrix} 0,0660 \\ 0,6153 \\ 0,3187 \end{pmatrix}$$



$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1/2 \\ 4 & 2 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^3 = \begin{pmatrix} 0,1429 \\ 0,2857 \\ 0,5714 \end{pmatrix}$$

Finalmente, se crea una tabla de decisión donde:

- Las alternativas corresponden a las filas.
- Las columnas son los elementos conectados en la jerarquía directamente con las alternativas.
- Los pesos de los elementos conectados directamente con cada alternativa se asocian a cada columna.
- Los valores en cada columna de la tabla con los pesos obtenidos por cada alternativa en la matriz asociada al criterio de dicha columna.

La alternativa que obtenga mayor peso será la elegida.

### Ejemplo.

*Veamos cuál sería la alternativa elegida en el ejemplo que hemos venido desarrollando.*

	0.5816	0.3090	0.1095				
	<i>coste</i>	<i>impacto</i>	<i>tiempo</i>				
<i>costa</i>	0.6667	0.0660	0.1429	$\implies$ Los pesos de cada alternativa son <table border="1" style="float: right;"> <tr><td>0.4238</td></tr> <tr><td>0.2860</td></tr> <tr><td>0.2903</td></tr> </table>	0.4238	0.2860	0.2903
0.4238							
0.2860							
0.2903							
<i>interior</i>	0.1111	0.6153	0.2857				
<i>mixto</i>	0.2222	0.3187	0.5714				

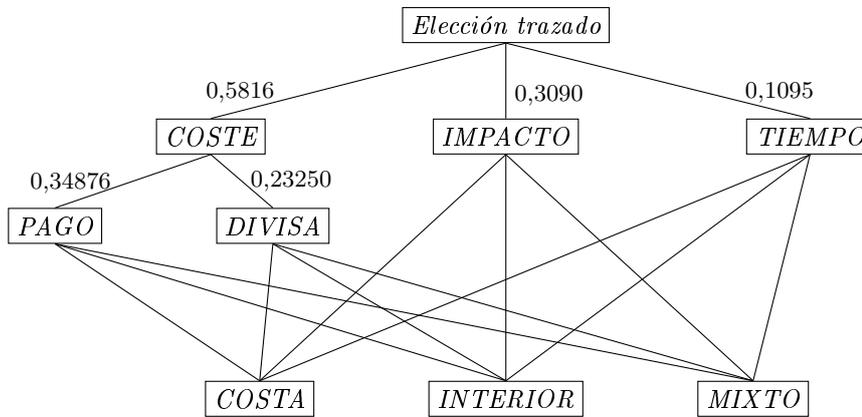
Por lo tanto, el mejor trazado para la autopista es la *costa*.

Cuando hay muchas alternativas para evaluar, en lugar de valorar cada alternativa para cada criterio del último nivel, para cada uno de esos criterios se podrían definir varias categorías propias y así establecer matrices de comparación dos a dos para cada una de ellas.

En este caso es más conveniente usar un segundo modo de calcular la tabla de decisión denominado “ratings mode”, que aunque es menos exacto (no da los mismos valores de prioridad que con el método clásico), los aproxima y es mucho más rápido de usar cuando hay muchas alternativas.

**Ejemplo.**

Supongamos que tenemos dos nuevos nodos relacionados con el coste con los pesos que se ven a continuación.



Supongamos que cada uno de los criterios PAGO, DIVISA, IMPACTO, TIEMPO tiene los rangos de valores que aparecen en la siguiente tabla:

PAGO	DIVISA	IMPACTO	TIEMPO
> 1000	euro	alto	< 1 año
> 2500	dólar	medio	< 2 años
> 5000	libra	bajo	> 2 años
	otras		

En este caso, el número de matrices de comparación que tendríamos que hacer sería muy elevado. Estableciendo matrices de comparación para cada una de esas categorías, se tiene:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} PAGO & > 1000 & > 2500 & > 5000 \end{matrix} \\ \begin{matrix} > 1000 \\ > 2500 \\ > 5000 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 8 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/8 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow w = \begin{pmatrix} 0,682 \\ 0,236 \\ 0,082 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} IMPACTO & alto & medio & bajo \end{matrix} \\ \begin{matrix} alto \\ medio \\ bajo \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/8 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 8 & 4 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow w = \begin{pmatrix} 0,078 \\ 0,205 \\ 0,717 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} DIVISA & euro & dólar & libra & otras \end{matrix} \\ \begin{matrix} euro \\ dólar \\ libra \\ otras \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow w = \begin{pmatrix} 0,430 \\ 0,283 \\ 0,200 \\ 0,087 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} TIEMPO & < 1año & < 2años & > 2años \end{matrix} \\ \begin{matrix} < 1año \\ < 2años \\ > 2años \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 5 \\ 1/9 & 1/5 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow w = \begin{pmatrix} 0,672 \\ 0,265 \\ 0,063 \end{pmatrix}$$

<i>PAGO</i>	<i>DIVISA</i>	<i>IMPACTO</i>	<i>TIEMPO</i>
> 1000	0.682	euro	0.430
> 2500	0.236	dólar	0.283
> 5000	0.082	libra	0.200
		otras	0.087
		alto	0.078
		medio	0.205
		bajo	0.717
		< 1año	0.672
		< 2años	0.265
		> 2años	0.063

Una vez establecidas la matrices de comparación, se evalúa cada alternativa para cada criterio según sus categorías. Por último, se usan estos pesos en la matriz de decisión final en lugar de las comparaciones de cada alternativa frente a cada criterio. Dado que los nuevos pesos que se obtienen no están normalizados, se normalizarán en caso de ser necesario.

**Ejemplo.** Para nuestro ejemplo, tendríamos:

	<i>PAGO</i>	<i>DIVISA</i>	<i>IMPACTO</i>	<i>TIEMPO</i>
<i>COSTA</i>	> 2500	0.236	dólar	0.283
<i>INTERIOR</i>	> 1000	0.682	euro	0.430
<i>MIXTO</i>	> 2500	0.236	dólar	0.283
			alto	0.078
			bajo	0.717
			< 1año	0.672
			< 2años	0.265
			> 2años	0.063

	0.34876	0.23250	0.3090	0.1095	=>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>pesos</th> <th>normalizados</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.246</td> <td>0.238</td> </tr> <tr> <td>0.570</td> <td>0.551</td> </tr> <tr> <td>0.218</td> <td>0.211</td> </tr> </tbody> </table>	pesos	normalizados	0.246	0.238	0.570	0.551	0.218	0.211
pesos	normalizados													
0.246	0.238													
0.570	0.551													
0.218	0.211													
<i>costa</i>	0.236	0.283	0.078	0.672										
<i>interior</i>	0.682	0.430	0.717	0.265										
<i>mixto</i>	0.236	0.283	0.205	0.063										

En este ejemplo, la mejor alternativa sería hacer la autopista por el interior.

Cuando los pesos de un AHP no los decide un único experto sino un grupo de  $T$  expertos, para calcular los pesos en este caso existen básicamente dos alternativas:

- **El voto consensuado:** En este método, todos los expertos del grupo se reúnen y deciden generar una única matriz  $M$ .
- **La media geométrica:** Cada uno de los  $T$  miembros del grupo crean su matriz  $M_t = \begin{pmatrix} m_{11}^t & \cdots & m_{1n}^t \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1}^t & \cdots & m_{nn}^t \end{pmatrix}$ . La matriz consensuada  $M^*$  se obtiene mediante el cálculo de la media geométrica de cada  $m_{ij}$ .

**Ejemplo.** Supongamos que tenemos las matrices de tres expertos, vamos a calcular la matriz de consenso.

$$\left. \begin{array}{l} M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 3 \\ 1/6 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^1 = \begin{pmatrix} 0,667 \\ 0,111 \\ 0,222 \end{pmatrix} \\ M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^2 = \begin{pmatrix} 0,558 \\ 0,122 \\ 0,320 \end{pmatrix} \\ M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 8 & 2 \\ 1/8 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^3 = \begin{pmatrix} 0,628 \\ 0,086 \\ 0,285 \end{pmatrix} \end{array} \right\} \Rightarrow M^* = \begin{pmatrix} 1 & 5,769 & 2,289 \\ 0,173 & 1 & 0,382 \\ 0,437 & 2,621 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow w^* = \begin{pmatrix} 0,620 \\ 0,106 \\ 0,274 \end{pmatrix}$$

Un problema de usar este procedimiento es que si hay mucha disparidad en las matrices  $M_i$ , la matriz de consenso  $M^*$  podría no ser representativa. Un procedimiento debido a Bryson [24] para chequear el grado de consenso entre los vectores  $w^t$  de cada decisor y el  $w^{GM}$  de consenso es el siguiente:

### 1. Definimos una función de similitud entre vectores $w$ .

Se han propuesto distintas funciones. En nuestro caso, usaremos la siguiente:  $s(w^t, w^r) = 1 - \text{sen}(w^t, w^r)$  que toma valores en el intervalo  $[0, 1]$  y a mayor similitud, mayor valor de  $s$ .

### 2. Definimos ratios de fuerte similitud y fuerte disimilitud.

Se define el ratio de fuerte similitud (*Group Strong Agreement Quotient*) de un vector frente al vector “de grupo”  $GM$  como:

$$GSAQ_\alpha = \frac{\sum_t \Gamma(t, GM)}{T}, \text{ donde } \Gamma(t, r) = \begin{cases} 1, & \text{si } s(t, r) \geq \alpha \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Se define el ratio de fuerte disimilitud (*Group Strong Disagreement Quotient*) como:

$$GSDQ_\delta = \frac{\sum_t \Phi(t, GM)}{T}, \text{ donde } \Phi(t, r) = \begin{cases} 1, & \text{si } s(t, r) \leq \delta \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Otra medida utilizada es la de mayor disimilitud (*Group Strong Disagreement Indicator*) entre cualesquiera dos vectores:

$$GSDI_{\delta} = \min_{t,r} \{s(t,r)\} - \delta.$$

### 3. Analizamos los ratios.

Para unos niveles  $\alpha$  y  $\delta$ , sólo se supondrá que existe consenso cuando al menos una determinada proporción  $GSAQ_{\alpha}$  de los T miembros (por ejemplo el 75 %) tiene una fuerte similitud con el vector  $GM$  resumen del grupo, y no más de una proporción  $GSDQ_{\delta}$  (por ejemplo el 20 %) tiene una fuerte disimilitud con  $GM$ . El vector  $GM$  de consenso se calculará como la media geométrica de todos los  $w^t$ , aunque podría calcularse de varias maneras a partir de los  $w^t$  de cada miembro.



## Capítulo 3

# Modelización del problema

### 3.1. Revisión de literatura

El *Inland Depot Container Selection Problem* fué estudiado por primera vez por Dejax et al. [25], quienes tratan este problema como parte de un estudio global del sistema logístico de una compañía europea de transporte y distribución de contenedores. Su enfoque es resolver secuencialmente un problema clásico de localización de depósitos, seguido de un problema de minimización del coste del flujo de contenedores entre los depósitos.

El *Multicommodity Capacitated Location Problem with Balancing Requirements* fue introducido en 1989 por Crainic, Dejax and Delorme [26]. Este problema está basado en el hecho de que una vez que un barco llega a puerto, los contenedores que vienen en él tienen que ser entregados a los clientes. Después de que el cliente descargue el contenedor, éste tiene que ser trasladado vacío a un depósito, y a partir de ahí, pueden ser entregados a otros clientes que soliciten contenedores para la exportación de sus propios productos. En algunas ocasiones los depósitos no disponen de los contenedores que el cliente les solicita y tienen que pedirlos a otros depósitos. El problema general es, localizar los depósitos para recoger los contenedores vacíos disponibles que puedan satisfacer las peticiones de los clientes, mientras se minimizan los costes totales de operación: los costes de apertura y funcionamiento de los depósitos y los costes generados por los movimientos entre los clientes y los depósitos.

Crainic, Delorme y Dejax [27] muestran que los métodos estándar de localización no son eficaces para este problema, pero el algoritmo de su branch-and-bound no puede probar la optimalidad de la solución en un tiempo razonable, excepto en los casos de datos simples. El modelo es resuelto más adelante mediante un procedimiento tabu search [28] cuyo tiempo de ejecución es bastante elevado, y mediante un algoritmo “dual-ascent” [29, 30].

La introducción de capacidades para los depósitos [26] es realmente interesante y especialmente realista a la hora de que las instalaciones existentes en puertos o estaciones ferroviarias trabajen con las compañías de transporte. De esta manera, la capacidad de un depósito puede representar una estimación del volumen total de contenedores vacíos que se pueden manejar desde dicho depósito, pudiendo ser transportados a los clientes que los requieran. Desde este punto de vista,

las capacidades de los depósitos no están destinadas a ser restricciones fuertes sino que pueden ser utilizadas para tomar las decisiones de localización más realistas. Todo esto, se puede traducir en un importante ahorro a nivel operativo o de coste restringiendo fuertemente estas capacidades.

Para la resolución del problema de localización de depósitos con restricciones de balance, Gendron et al. [31] combinan tabu search con slope scaling para obtener buenas soluciones a gran escala, ya que, aunque dicho problema se puede formular como una programación entera mixta, los resultados experimentales para casos grandes no se pueden resolver de manera óptima con este método.

En este proyecto, al problema tratado previamente en la literatura se le ha incorporado la minimización del impacto ambiental que producen las operaciones de transporte que se realizan en los depósitos de contenedores. De esta manera, se pretende que la localización de los depósitos de contenedores no sólo tenga en cuenta la minimización de los costes, sino que atienda además al impacto ambiental que generaran las operaciones de transporte de contenedores asociadas a la localización de dichos depósitos.

### 3.2. Modelo

El modelo propuesto en este proyecto se basa inicialmente en el propuesto por Gendron et al. [31]. Las diferencias fundamentales respecto a dicho modelo son que además de clientes y depósitos, en nuestro modelo intervienen terminales y, sobre todo, la consideración de una segunda función objetivo que representa el impacto medioambiental de los flujos de contenedores que se dirigen/originan en los depósitos. Su definición es la siguiente:

Tenemos una serie de depósitos, algunos ya existentes, otros potenciales, y hay que decidir cuales de ellos van a ser utilizados para el almacenaje de los contenedores vacíos que se necesitan para la exportación/importación de mercancías por parte de los clientes a través de los terminales. Tenemos pues, tres tipos de nodos en la red:

- Clientes ( $s$ )
- Depósitos ( $d$ )
- Terminales ( $t$ )

Se supone que desde cada terminal  $t$  se sirve a un subconjunto de clientes  $S(t)$  e igualmente desde cada terminal  $t$  se trabaja con un subconjunto de depósitos  $D(t)$  y desde cada cliente  $s$  se pueden alcanzar un subconjunto de depósitos  $D(s)$ . Todas estas relaciones son bidireccionales, es decir, si el terminal  $t$  sirve al cliente  $s$ , el cliente  $s$  trabaja con el terminal  $t$ . De este modo, existen también los conjuntos  $T(s)$ ,  $T(d)$  y  $S(d)$  cumpliéndose que:

- $s \in S(t) \iff t \in T(s)$
- $d \in D(t) \iff t \in T(d)$

$$\blacksquare d \in D(s) \iff s \in S(d)$$

En cualquier caso, se puede suponer que todos los terminales/depósitos pueden trabajar con todos los clientes.

Vamos a definir los parámetros y las variables que tenemos en nuestro modelo:

<i>Parámetros</i>	<i>Descripción</i>
$I_{st}$	Número de contenedores que importa anualmente el cliente $s$ a través de $t$ .
$E_{st}$	Número de contenedores que exporta anualmente el cliente $s$ a través de $t$ .
$K_d$	Límite de capacidad sobre el volumen de flujo (entrada y salida) del depósito $d$ que queda libre tras descontar las operaciones con contenedores llenos.
$K_t$	Límite de capacidad sobre el volumen de flujo (entrada y salida) del terminal $t$ que queda libre tras descontar las operaciones con contenedores llenos.
$f_d$	Coste fijo de operación del depósito $d$ .
$c_{st}$	Coste unitario de transporte entre $s$ y $t$ (en cualquier dirección).
$c_{sd}$	Coste unitario de transporte entre $s$ y $d$ (en cualquier dirección).
$c_{td}$	Coste unitario de transporte entre $t$ y $d$ (en cualquier dirección).
$w_d$	Impacto medioambiental por unidad de flujo desde/hasta el depósito $d$ .

Tabla 3.1: Parámetros del modelo

<i>Variables</i>	<i>Descripción</i>
$x_{st}$	Flujo entre el cliente $s$ y el terminal $t$ .
$x_{sd}$	Flujo entre el cliente $s$ y el depósito $d$ .
$x_{td}$	Flujo entre el terminal $t$ y el depósito $d$ .
$y_t$	Flujo que entra en el terminal $t$ .
$z_d$	Flujo que entra en el depósito $d$ .
$x_{ts}$	Flujo entre el terminal $t$ y el cliente $s$ .
$x_{ds}$	Flujo entre del depósito $d$ y el cliente $s$ .
$x_{dt}$	Flujo entre el depósito $d$ y el terminal $t$ .
$\hat{y}_t$	Flujo que sale del terminal $t$ .
$\hat{z}_d$	Flujo que sale del depósito $d$ .
$\delta_d$	Variable binaria que indica si se usa o no el depósito $d$ .

Tabla 3.2: Variables del modelo

Nótese que se han definido los flujos entre  $d$  y  $t$ , necesarios para poder equilibrar los sobreflujos que lleguen a un depósito.

Una vez definidas las constantes y variables un primer modelo sería:

*Modelo 1:*

$$\text{mín} \quad \sum_d f_d \delta_d + \sum_s \sum_{t \in T(s)} c_{st} (x_{st} + x_{ts}) + \sum_t \sum_{d \in D(t)} c_{td} (x_{td} + x_{dt}) + \sum_s \sum_{d \in D(s)} c_{sd} (x_{sd} + x_{ds})$$

$$\text{mín} \quad \sum_d w_d (z_d + \hat{z}_d)$$

s.t.

$$y_t = \sum_{s \in S(t)} x_{st} + \sum_{d \in D(t)} x_{dt} \quad \forall t$$

$$\hat{y}_t = \sum_{s \in S(t)} x_{ts} + \sum_{d \in D(t)} x_{td} \quad \forall t$$

$$\hat{y}_t = y_t + \sum_s E_{st} - \sum_s I_{st} \quad \forall t$$

$$y_t + \hat{y}_t \leq K_t \quad \forall t$$

$$\sum_{t \in T(s)} x_{ts} + \sum_{d \in D(s)} x_{ds} = \sum_{t \in T(s)} E_{st} \quad \forall s$$

$$\sum_{t \in T(s)} x_{st} + \sum_{d \in D(s)} x_{sd} = \sum_{t \in T(s)} I_{st} \quad \forall s$$

$$z_d = \sum_{s \in S(d)} x_{sd} + \sum_{t \in T(d)} x_{td} \quad \forall d$$

$$\hat{z}_d = \sum_{s \in S(d)} x_{ds} + \sum_{t \in T(d)} x_{dt} \quad \forall d$$

$$z_d = \hat{z}_d \quad \forall d$$

$$z_d + \hat{z}_d \leq K_d \delta_d \quad \forall d$$

$$\delta_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \quad \text{el resto de variables no negativas}$$

Se observa que en este modelo:

- Se definen dos funciones objetivo, una que recoge el coste total del sistema y otra el impacto total provocado por los depósitos.
- La primera restricción asegura que el flujo total que entra en cada terminal sea exactamente la suma del flujo de los clientes a la terminal más el flujo de los depósitos a la terminal.
- La segunda restricción asegura que el flujo total que sale de cada terminal sea exactamente la suma del flujo de la terminal a los clientes más el flujo de la terminal a los depósitos.
- La tercera restricción asegura que el flujo que sale de cada terminal más la exportación de todos los clientes desde cada terminal menos la importación de los clientes desde cada terminal sea exactamente igual al flujo que sale de cada terminal.
- La cuarta restricción asegura que la suma del flujo de entrada y salida de cada terminal no exceda el límite de capacidad de flujo de cada terminal.
- La quinta restricción asegura que el flujo de las terminales a cada cliente más el flujo de los depósitos a cada cliente sea exactamente igual a la exportación de cada cliente.

- La sexta restricción asegura que el flujo de cada cliente a las terminales más el flujo de cada cliente a los depósitos sea exactamente igual a la importación de cada cliente.
- La séptima restricción asegura que el flujo total que entra en cada depósito sea exactamente la suma del flujo de los clientes al depósito más el flujo de la terminal a los depósitos.
- La octava restricción asegura que el flujo total que sale de cada depósito sea exactamente la suma del flujo del depósito a los clientes más el flujo del depósito a la terminal.
- La novena restricción asegura que para cada depósito el flujo de entrada es igual al flujo de salida.
- La décima restricción asegura que el flujo total de cada depósito no exceda el límite de capacidad de flujo de cada depósito.

El modelo se podría simplificar de manera sencilla eliminando las variables  $\hat{z}_d$  y las correspondientes restricciones de balance. Tendríamos entonces:

*Modelo 2:*

$$\text{mín} \quad \sum_d f_d \delta_d + \sum_s \sum_{t \in T(s)} c_{st} (x_{st} + x_{ts}) + \sum_t \sum_{d \in D(t)} c_{td} (x_{td} + x_{dt}) + \sum_s \sum_{d \in D(s)} c_{sd} (x_{sd} + x_{ds})$$

$$\text{mín} \quad 2 \sum_d w_d z_d$$

s. t.

$$y_t = \sum_{s \in S(t)} x_{st} + \sum_{d \in D(t)} x_{dt} \quad \forall t$$

$$\hat{y}_t = \sum_{s \in S(t)} x_{ts} + \sum_{d \in D(t)} x_{td} \quad \forall t$$

$$\hat{y}_t = y_t + \sum_s E_{st} - \sum_s I_{st} \quad \forall t$$

$$y_t + \hat{y}_t \leq K_t \quad \forall t$$

$$\sum_{t \in T(s)} x_{ts} + \sum_{d \in D(s)} x_{ds} = \sum_{t \in T(s)} E_{st} \quad \forall s$$

$$\sum_{t \in T(s)} x_{st} + \sum_{d \in D(s)} x_{sd} = \sum_{t \in T(s)} I_{st} \quad \forall s$$

$$z_d = \sum_{s \in S(d)} x_{sd} + \sum_{t \in T(d)} x_{td} \quad \forall d$$

$$z_d = \sum_{s \in S(d)} x_{ds} + \sum_{t \in T(d)} x_{dt} \quad \forall d$$

$$2z_d \leq K_d \delta_d \quad \forall d$$

$$\delta_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \quad \text{el resto de variables no negativas}$$

Equivalentemente, podemos escribir nuestro modelo sin usar las variables  $z_d$ ,  $y_t$  e  $\hat{y}_t$ . El modelo definitivo que consideraremos será por tanto:

*Modelo 3:*

$$\text{mín} \quad \sum_d f_d \delta_d + \sum_s \sum_{t \in T(s)} c_{st} (x_{st} + x_{ts}) + \sum_t \sum_{d \in D(t)} c_{td} (x_{td} + x_{dt}) + \sum_s \sum_{d \in D(s)} c_{sd} (x_{sd} + x_{ds})$$

$$\text{mín} \quad 2 \sum_d w_d \left( \sum_{s \in S(d)} x_{sd} + \sum_{t \in T(d)} x_{td} \right)$$

s.t.

$$\sum_{s \in S(t)} x_{st} + \sum_{d \in D(t)} x_{dt} + \sum_s E_{st} = \sum_{s \in S(t)} x_{ts} + \sum_{d \in D(t)} x_{td} + \sum_s I_{st} \quad \forall t \quad (1)$$

$$\sum_{s \in S(d)} x_{sd} + \sum_{t \in T(d)} x_{td} = \sum_{s \in S(d)} x_{ds} + \sum_{t \in T(d)} x_{dt} \quad \forall d \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T(s)} x_{st} + \sum_{d \in D(s)} x_{sd} = \sum_{t \in T(s)} I_{st} \quad \forall s \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T(s)} x_{ts} + \sum_{d \in D(s)} x_{ds} = \sum_{t \in T(s)} E_{st} \quad \forall s \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S(t)} x_{st} + \sum_{d \in D(t)} x_{dt} + \sum_{s \in S(t)} x_{ts} + \sum_{d \in D(t)} x_{td} \leq K_t \quad \forall t \quad (5)$$

$$2 \left( \sum_{s \in S(d)} x_{sd} + \sum_{t \in T(d)} x_{td} \right) \leq K_d \delta_d \quad \forall d \quad (6)$$

En este caso:

- La primera de las funciones objetivo recoge el coste total del sistema: el primer sumando corresponde al coste que conlleva tener abiertos los depósitos; el segundo sumando al coste del flujo entre los clientes y los terminales; el tercero al coste del flujo entre los terminales y los depósitos, y el último sumando corresponde al coste del flujo entre los clientes y los depósitos.
- La segunda de las funciones objetivo se refiere al impacto total provocado por los depósitos que se decida abrir.
- La restricción 1 garantiza que todos los contenedores que llegan a un terminal, sean exactamente igual a los que salgan de dicho terminal.

- La restricción 2 garantiza que todos los contenedores que llegan a un depósito, sean exactamente igual a los que salgan de dicho depósito.
- La restricción 3 garantiza que todos los contenedores que importa un cliente son distribuidos como vacíos para ser almacenados en un depósito o una terminal.
- La restricción 4 garantiza que todos los contenedores que exporta un cliente son recibidos como vacíos desde un depósito o una terminal.
- La restricción 5 garantiza que los movimientos de contenedores vacíos que se procesan en la terminal no excedan la capacidad operativa libre (descontando el movimiento de los llenos) de esa terminal.
- La restricción 6 garantiza que todos los contenedores que se mueven (entrada o salida) del depósito no excedan la capacidad operativa de dicho depósito (según la restricción 2 todos los movimientos son el doble de los movimientos de entrada; esto también se aplica a la definición del segundo objetivo).
- En la restricción 1 el exceso de contenedores que puedan aparecer en la terminal (cuando la importación es superior a la exportación) podrían entenderse como contenedores que son exportados vacíos desde la terminal.

Hay que notar que este modelo es de carácter estático y por tanto se supone que a largo plazo es estable. Por esa razón, se supone que debe de haber un equilibrio en el número de contenedores que circulan por el sistema, y por tanto, ese equilibrio se produce en cada elemento (terminal en la restricción 1, depósito en la restricción 2 y cliente en las restricciones 3 y 4).

También se ha de tener en cuenta que los terminales pese a actuar también como depósitos, no son considerados en las funciones objetivo, ya que en ningún caso se considera la opción de cerrar un terminal. Se da por hecho que éstos están siempre en funcionamiento.

Nótese asimismo que esta última formulación es más compacta, teniendo una mayor similitud con el modelo en [31]. Comparando ambos modelos, se ve que las diferencias están en que en nuestro modelo, hay una segunda función objetivo y que aparte de los depósitos, también se consideran terminales.



## Capítulo 4

# Caso de aplicación: hinterland del puerto de Valencia

Como se comentó anteriormente, para testar el modelo definido se eligió como caso de aplicación el del puerto de Valencia. Para ello se ha contado con la colaboración de la Fundación Valenciaport, que ha facilitado la información necesaria para la ejecución del modelo. A continuación se presentan los datos obtenidos, los resultados experimentales y una discusión de los mismos.

### 4.1. Toma de datos

Como datos para poder ejecutar el modelo anterior, son necesarios los relativos a: los clientes, los depósitos, los terminales, los costes y los impactos.

#### 4.1.1. Clientes

Anualmente el puerto de Valencia mueve alrededor de 2000000 de contenedores. La Comunidad Valenciana y Murcia generan aproximadamente el 70 % de esos movimientos. Para probar este modelo, se ha tomado una muestra de 357 clientes de dichas Comunidades Autónomas, identificados por códigos postales. Dichos clientes efectúan un total de 54363 movimientos de contenedores anuales, lo que supone aproximadamente el 4 % del total de movimientos de contenedores que se realizan en estas dos provincias.

#### 4.1.2. Depósitos

En el hinterland del puerto de Valencia existen en la actualidad 8 depósitos de contenedores. Los depósitos existentes (Figura 4.1) en estas dos regiones y sus capacidades son:

- Depósito 1: Riba-roja de Turia con una capacidad aproximada de 125000 movimientos de

contenedores anuales.

- Depósito 2: Náquera con una capacidad aproximada de 50000 movimientos de contenedores anuales.
- Depósito 3: Alfafar con una capacidad aproximada de 125000 movimientos de contenedores anuales.
- Depósito 4: Quart de Poblet con una capacidad aproximada de 112500 movimientos de contenedores anuales.
- Depósito 5: Castellar con una capacidad aproximada de 50000 movimientos de contenedores anuales.
- Depósito 6: Sagunto con una capacidad aproximada de 95000 movimientos de contenedores anuales.
- Depósito 7: Puerto de Alicante con una capacidad aproximada de 50000 movimientos de contenedores anuales.
- Depósito 8: Puerto de Cartagena con una capacidad aproximada de 125000 movimientos de contenedores anuales.

En un proceso de optimización teniendo en cuenta el flujo de contenedores de los clientes de sus alrededores además de los depósitos mencionados anteriormente, técnicos del puerto de Valencia han sugerido otras 11 nuevas posibles ubicaciones de depósitos que el modelo podría considerar. Como éstos nuevos depósitos son potenciales, se les ha dado a todos una capacidad de 95000 movimientos de contenedores anuales. Las nuevas ubicaciones que se han propuesto son (Figura 4.1):

- Depósito 9: Almussafes.
- Depósito 10: Onda.
- Depósito 11: L'Alcora.
- Depósito 12: Albal.
- Depósito 13: Villareal.
- Depósito 14: Novelda.
- Depósito 15: Jumilla.
- Depósito 16: Requena.
- Depósito 17: Murcia.
- Depósito 18: Ibi.
- Depósito 19: Chiva.

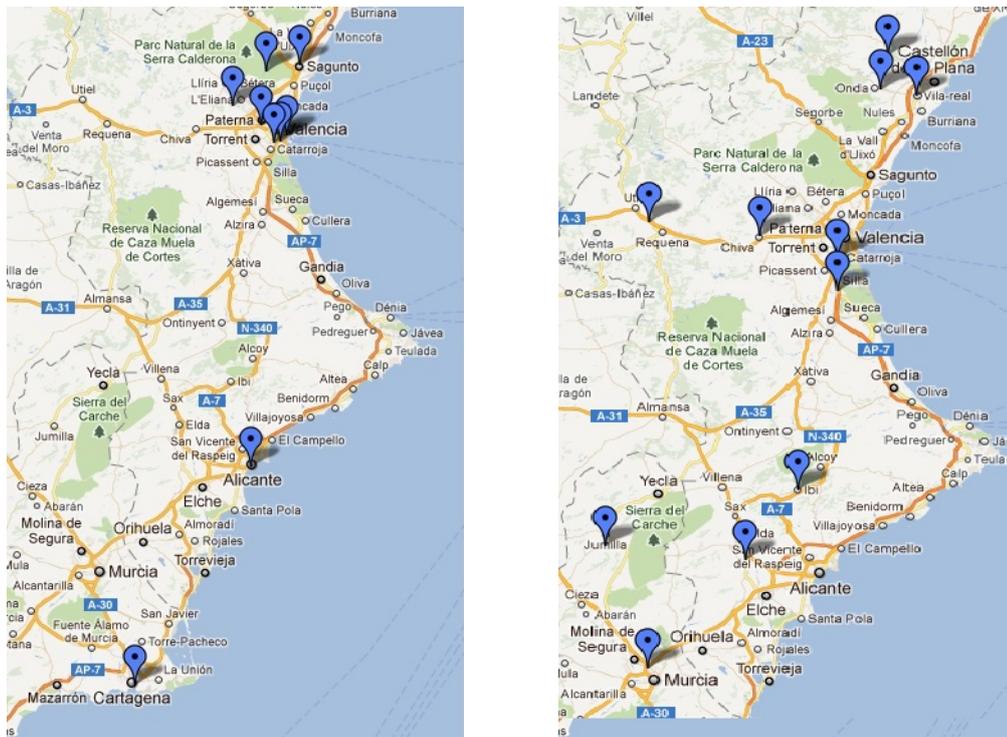


Figura 4.1: Ubicación de los depósitos: existentes (izda.) y potenciales (dcha.)

#### 4.1.3. Terminales

Para la resolución del modelo presentado en el capítulo anterior, se ha considerado un único terminal, el puerto de Valencia. La capacidad de dicho terminal se ha estimado en unos 625000 movimientos de contenedores anuales.

#### 4.1.4. Costes

Si atendemos a la primera función objetivo, podemos observar que existen dos tipos de costes claramente diferenciados: por un lado, los costes fijos de funcionamiento de los depósitos, y por otro, los costes por unidad de flujo entre todas las combinaciones de clientes, depósitos y terminales.

El coste fijo anual de funcionamiento de un depósito es difícil de estimar porque depende mucho de lo que se esté pagando por el suelo. Según los datos proporcionados por técnicos del puerto de Valencia, se podría estimar 1000000€ de coste fijo para un depósito de unos 250000 movimientos anuales, de los cuales el 30% puede ser coste de personal. Los costes para nuestros depósitos se han estimado proporcionalmente a su tamaño teniendo en cuenta el dato anterior.

Para el cálculo de los costes por unidad de flujo, se han calculado las distancias (km.) en línea recta entre cada cliente y depósito, cliente y terminal, y depósito y terminal, y se han multiplicado por el coste unitario por km de transporte de contenedor (1,152€/km según el observatorio de costes de transporte por carretera - Enero 2010 - vehículos portacontenedores. Ministerio de

Fomento). Se ha decidido tomar las distancias en línea recta debido a la gran complejidad de obtener las distancias por carretera para todas estas duplas, teniendo en cuenta que se parte de 357 clientes, 19 depósitos y 1 terminal. Para ello, se ha utilizado una base de datos que contiene la longitud y latitud de todos los códigos postales de España, y mediante un programa en MATLAB se han obtenido las distancias que los separan sabiendo que la distancia en línea recta entre dos puntos de la superficie terrestre se calcula en función de su longitud y latitud como:

$$dist(a,b) = \sqrt{(111,11(lat(a) - lat(b)))^2 + \left(111,11|lon(a) - lon(b)| \cos\left(\frac{lat(a) + lat(b)}{2} \frac{\pi}{180}\right)\right)^2}$$

#### 4.1.5. Impacto

Como ya se ha mencionado anteriormente, obtener datos acerca del impacto que provoca el transporte generado por la localización de un depósito no es tarea sencilla. Para ello, se ha decidido aplicar la metodología AHP para lo que se contó con la opinión de 5 expertos logísticos y 5 potenciales vecinos de un depósito sobre sus preferencias entre los 5 criterios de medición del impacto mencionados en la Sección 1.3: la contaminación atmosférica (c. at.), la contaminación acústica (c. ac.), la contaminación visual (c. v.), la congestión del tráfico (c. t.) y la accidentabilidad (ac.). Las matrices de comparación que se obtuvieron en cada uno de los casos fueron las siguientes:

$$M_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \end{matrix} \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 2 & 6 & 6 \\ 4 & 1 & 7 & 9 & 9 \\ 1/2 & 1/7 & 1 & 3 & 4 \\ 1/6 & 1/9 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/6 & 1/9 & 1/4 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M_1) = 0,0374 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_1 = \begin{pmatrix} 0,2135 \\ 0,5847 \\ 0,1168 \\ 0,0434 \\ 0,0416 \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \end{matrix} \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 4 & 3 & 1/7 & 1/6 \\ 1/4 & 1 & 6 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/6 & 1 & 1/6 & 1/5 \\ 7 & 3 & 6 & 1 & 1 \\ 6 & 3 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M_2) = 0,1915 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M_2' = \begin{matrix} & \begin{matrix} c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \end{matrix} \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/7 & 1/6 \\ 1 & 1 & 6 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/6 & 1 & 1/6 & 1/5 \\ 7 & 3 & 6 & 1 & 1 \\ 6 & 3 & 5 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M_2') = 0,0715 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_2 = \begin{pmatrix} 0,0877 \\ 0,1366 \\ 0,0430 \\ 0,3786 \\ 0,3541 \end{pmatrix}$$

$$M_3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \end{matrix} \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 7 & 1 & 4 \\ 1/3 & 1 & 6 & 1/5 & 4 \\ 1/7 & 1/6 & 1 & 1/7 & 1 \\ 1 & 5 & 7 & 1 & 5 \\ 1/4 & 1/4 & 1 & 1/5 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M_3) = 0,0649 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_3 = \begin{pmatrix} 0,3328 \\ 0,1606 \\ 0,0443 \\ 0,4044 \\ 0,0579 \end{pmatrix}$$

$$M_4 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/7 & 1/8 & 1/6 & 1/6 \\ 7 & 1 & 1/6 & 1 & 1/7 \\ 8 & 6 & 1 & 7 & 1/8 \\ 6 & 1 & 1/7 & 1 & 1/7 \\ 6 & 7 & 8 & 7 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M_4) = 0,27 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M'_4 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/5 & 1/8 & 1/5 & 1/9 \\ 5 & 1 & 1/6 & 1 & 1/7 \\ 8 & 6 & 1 & 7 & 1/3 \\ 5 & 1 & 1/7 & 1 & 1/7 \\ 9 & 7 & 3 & 7 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M'_4) = 0,0992 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_4 = \begin{pmatrix} 0,0283 \\ 0,0768 \\ 0,3117 \\ 0,0755 \\ 0,5077 \end{pmatrix}$$

$$M_5 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/6 & 6 & 1/7 & 6 \\ 6 & 1 & 8 & 7 & 8 \\ 1/6 & 1/8 & 1 & 1/7 & 1/6 \\ 7 & 1/7 & 7 & 1 & 1/7 \\ 1/6 & 1/8 & 6 & 7 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M_5) = 0,73 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M'_5 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/6 & 6 & 1 & 2 \\ 6 & 1 & 9 & 7 & 8 \\ 1/6 & 1/9 & 1 & 1/7 & 1/6 \\ 1 & 1/7 & 7 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/8 & 6 & 1 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M'_5) = 0,0822 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_5 = \begin{pmatrix} 0,1354 \\ 0,6172 \\ 0,0285 \\ 0,1194 \\ 0,0995 \end{pmatrix}$$

$$M_6 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/5 & 1/8 & 1/2 & 1 \\ 5 & 1 & 1 & 6 & 8 \\ 8 & 1 & 1 & 8 & 8 \\ 2 & 1/6 & 1/8 & 1 & 1 \\ 1 & 1/8 & 1/8 & 1 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M_6) = 0,0212 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_6 = \begin{pmatrix} 0,0539 \\ 0,3817 \\ 0,4405 \\ 0,0688 \\ 0,0551 \end{pmatrix}$$

$$M_7 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/8 & 7 & 1/6 & 1/7 \\ 8 & 1 & 9 & 6 & 6 \\ 1/7 & 1/9 & 1 & 1/8 & 1/7 \\ 6 & 1/6 & 8 & 1 & 1 \\ 7 & 1/6 & 7 & 1 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M_7) = 0,1919 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M'_7 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/8 & 2 & 1/6 & 1/7 \\ 8 & 1 & 9 & 5 & 5 \\ 1/2 & 1/9 & 1 & 1/8 & 1/7 \\ 6 & 1/5 & 8 & 1 & 1 \\ 7 & 1/5 & 7 & 1 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M'_7) = 0,0833 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_7 = \begin{pmatrix} 0,0429 \\ 0,5601 \\ 0,0304 \\ 0,1822 \\ 0,1845 \end{pmatrix}$$

$$M_8 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ c. at. & \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 1/8 & 8 & 7 & 1/6 \\ 8 & 1 & 7 & 8 & 5 \\ 1/8 & 1/7 & 1 & 1/6 & 1/8 \\ 1/7 & 1/8 & 6 & 1 & 1/8 \\ 6 & 1/5 & 8 & 8 & 1 \end{array} \right) \\ c. ac. & \\ c. v. & \\ c. t. & \\ ac. & \end{matrix} \Rightarrow RC(M_8) = 0,3071 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M'_8 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 7 & 4 & 1/4 \\ 7 & 1 & 9 & 8 & 3 \\ 1/7 & 1/9 & 1 & 1/2 & 1/8 \\ 1/4 & 1/8 & 2 & 1 & 1/8 \\ 4 & 1/3 & 8 & 8 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M'_8) = 0,0899 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_8 = \begin{pmatrix} 0,1203 \\ 0,5239 \\ 0,0301 \\ 0,0434 \\ 0,2824 \end{pmatrix}$$

$$M_9 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/8 & 1/7 & 1/9 & 6 \\ 8 & 1 & 9 & 1 & 5 \\ 7 & 1/9 & 1 & 1/7 & 1/3 \\ 9 & 1 & 7 & 1 & 1 \\ 1/6 & 1/5 & 3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M_9) = 0,6486 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M'_9 = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/8 & 1/3 & 1/9 & 1/2 \\ 8 & 1 & 9 & 1 & 5 \\ 3 & 1/9 & 1 & 1/7 & 1/3 \\ 9 & 1 & 7 & 1 & 1 \\ 2 & 1/5 & 3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M'_9) = 0,0967 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_9 = \begin{pmatrix} 0,0415 \\ 0,4366 \\ 0,0604 \\ 0,3119 \\ 0,1496 \end{pmatrix}$$

$$M_{10} = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 8 & 1 & 5 \\ 7 & 1 & 9 & 1 & 5 \\ 1/8 & 1/9 & 1 & 1/2 & 1/8 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 1/6 \\ 1/5 & 1/5 & 8 & 6 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M_{10}) = 0,4401 \Rightarrow \text{No consistente. Corregimos la matriz.}$$

$$M'_{10} = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 1/6 & 7 & 1 & 1 \\ 6 & 1 & 9 & 3 & 5 \\ 1/7 & 1/9 & 1 & 1/2 & 1/8 \\ 1 & 1/3 & 2 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1/5 & 8 & 3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M'_{10}) = 0,0981 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow w_{10} = \begin{pmatrix} 0,1397 \\ 0,5377 \\ 0,0346 \\ 0,1014 \\ 0,1866 \end{pmatrix}$$

Una vez que se ha conseguido la consistencia de estas matrices, se ha estudiado el grado de consenso entre los vectores  $w_i$  de cada decisor, y se ha determinado que los decisores más afines son: 1, 5, 7, 8, 9, 10. Para ello, se han tomado unos valores de  $\alpha = 0,7$  y  $\delta = 0,7$  con unos valores de  $GSAQ = 0,8333$  y  $GSDQ = 0,1667$ . A partir de estos seis decisores la matriz de consenso sería la siguiente:

$$M^* = \begin{matrix} & c. at. & c. ac. & c. v. & c. t. & ac. \\ \begin{matrix} c. at. \\ c. ac. \\ c. v. \\ c. t. \\ ac. \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0,1092 & 3,3011 & 0,8503 & 0,7348 \\ 9,1607 & 1 & 13,2820 & 5,9663 & 7,6961 \\ 0,3029 & 0,0753 & 1 & 0,2860 & 0,2183 \\ 1,1761 & 0,1676 & 3,4966 & 1 & 0,5296 \\ 1,3608 & 0,1299 & 4,5803 & 1,8882 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow RC(M^*) = 0,0281 \Rightarrow \text{Consistente} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow w^* = \begin{pmatrix} 0,1218 \\ 0,5280 \\ 0,0604 \\ 0,1291 \\ 0,1607 \end{pmatrix}$$

Como son muchas las alternativas que tenemos para evaluar (19 depósitos), se han definido tres categorías propias para cada uno de los criterios (ALTA, MEDIA, BAJA) y se han establecido matrices de comparación para cada una de ellas. Se han considerado dos matrices de comparación, una relacionada con la contaminación acústica y el ruido (E), y otra relacionada con los tres criterios restantes (L).

$$E = \begin{matrix} & A & M & B \\ \begin{matrix} A \\ M \\ B \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 3 & 9 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/9 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow w_E = \begin{pmatrix} 0,6923 \\ 0,2308 \\ 0,0769 \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{matrix} & A & M & B \\ \begin{matrix} A \\ M \\ B \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \Rightarrow w_L = \begin{pmatrix} 0,5954 \\ 0,2764 \\ 0,1283 \end{pmatrix}$$

Para cada uno de los depósitos, un experto del puerto de Valencia ha proporcionado la información acerca del nivel de cada uno de los criterios para cada uno de los depósitos. Con esto, los resultados del impacto generado por cada depósito por unidad de flujo a usar en el modelo son los siguientes:

	0.1218 C. atmosférica		0.5280 C. acústica		0.0604 C. visual		0.1291 C. tráfico		0.1607 Accidentabilidad		Impacto
Depósito 1	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	A	0,5953790	M	0,2307692	0,286137793
Depósito 2	B	0,1282705	M	0,2307692	M	0,2763505	B	0,1282705	B	0,0769231	0,18308092
Depósito 3	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	A	0,6923077	0,662136564
Depósito 4	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	A	0,6923077	0,662136564
Depósito 5	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	A	0,6923077	0,662136564
Depósito 6	M	0,2763505	M	0,2307692	B	0,1282705	B	0,1282705	M	0,2307692	0,216901947
Depósito 7	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	M	0,2307692	0,587962922
Depósito 8	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	M	0,2307692	0,587962922
Depósito 9	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	A	0,5953790	M	0,2307692	0,286137793
Depósito 10	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	A	0,5953790	M	0,2307692	0,286137793
Depósito 11	M	0,2763505	M	0,2307692	B	0,1282705	A	0,5953790	M	0,2307692	0,277196635
Depósito 12	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	A	0,6923077	0,662136564
Depósito 13	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	A	0,5953790	M	0,2307692	0,286137793
Depósito 14	M	0,2763505	M	0,2307692	B	0,1282705	M	0,2763505	M	0,2307692	0,236016208
Depósito 15	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	B	0,1282705	M	0,2307692	0,225843105
Depósito 16	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	M	0,2763505	M	0,2307692	0,244957366
Depósito 17	A	0,5953790	A	0,6923077	A	0,5953790	A	0,5953790	A	0,6923077	0,662136564
Depósito 18	M	0,2763505	M	0,2307692	B	0,1282705	M	0,2763505	M	0,2307692	0,236016208
Depósito 19	M	0,2763505	M	0,2307692	M	0,2763505	M	0,2763505	M	0,2307692	0,244957366

Tabla 4.1: Impacto por unidad de flujo en cada depósito

Hay que notar que en la evaluación final del impacto no se han normalizado los resultados obtenidos. Esto se debe a que la medición del impacto que se pretende hacer es de una manera global para todo el sistema. La normalización solo sería necesaria en caso de querer comparar el impacto de los depósitos entre ellos.

## 4.2. Resultados experimentales

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para realizar los experimentos, se ha programado el modelo definido anteriormente en LINGO (ver Apéndice C). Se ha decidido utilizar este software de optimización debido a que la “compacidad” del modelo definido junto a la decisión de utilizar el método de las  $\varepsilon$ -restricciones para incluir la segunda función objetivo como una restricción, hace que sea una elección muy apropiada.

La solución inicial que se obtuvo al resolver el Modelo 3 sin ninguna restricción sobre el impacto se presenta en la tabla 4.2. Esta solución representa la opción de menor coste para toda la red. Los 8 depósitos que se abrirían en esta situación (2 de los actuales y 6 de los potenciales considerados) se pueden observar en la figura 4.2.

Coste	Impacto	Depósitos																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4177,48193	9198,4654	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0

Tabla 4.2: Solución inicial



Figura 4.2: Solución inicial (depósitos abiertos en negro)

En esta figura están representadas en color negro las ubicaciones de los depósitos que abren y en color rojo los que se cerrarán o no se abrirán (aparecen subrayados los abiertos actualmente). Ade-

más, las ubicaciones de los depósitos existentes están subrayadas. Una vez que se ha obtenido la solución inicial, se introduce la  $\varepsilon$ -restricción. Para ello, se impone como restricción que el impacto ha de ser menor o igual al impacto obtenido en la solución inicial  $(c, i) = (4177,48193, 9198,4654)$  multiplicado por un valor  $\alpha \in [0, 1]$ . El valor  $\alpha$  se va disminuyendo en cada ejecución hasta llegar a un límite del impacto para el cuál la solución sea infactible  $\alpha \leq 0,7585$ . Los resultados obtenidos se pueden consultar con detalle en el Apéndice A (ver tabla A.1).

En dicha tabla se observa cómo a medida que disminuye el impacto, aumenta el coste total del sistema. Todas estas soluciones han sido representadas gráficamente (ver figura 4.3) para que se pueda tener una mejor idea de la frontera de Pareto obtenida.

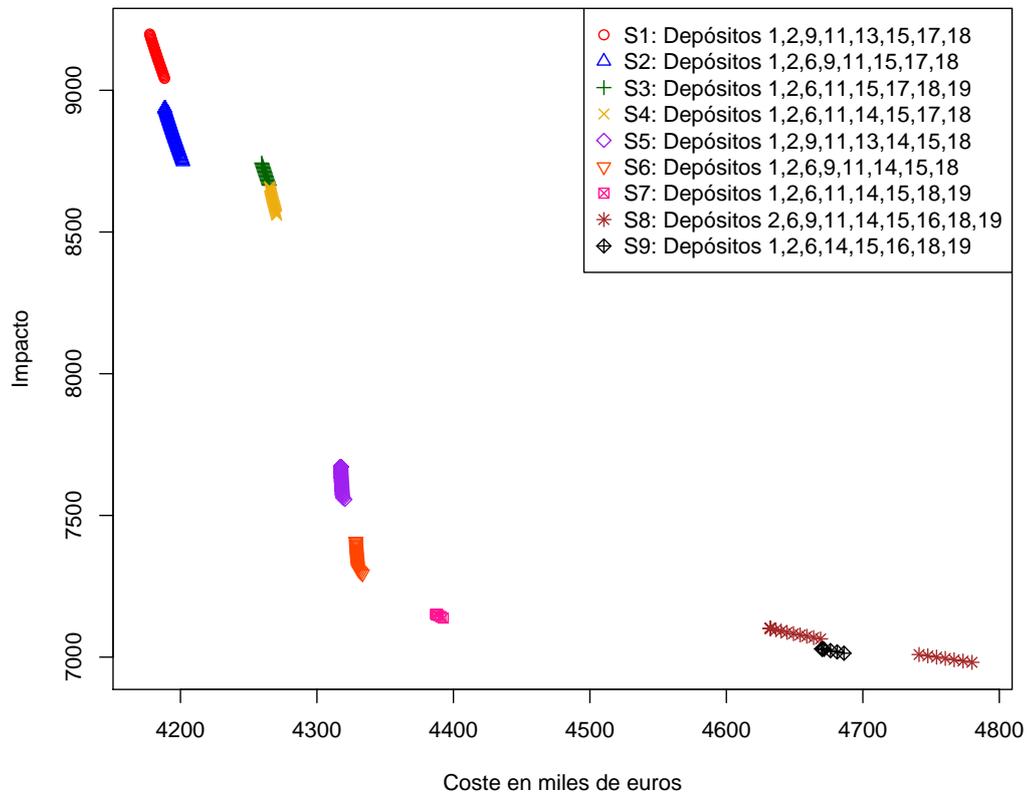


Figura 4.3: Representación gráfica de los experimentos

Se puede observar como no hay ninguna solución que domine a otra. Todas las soluciones halladas son Pareto óptimas. Representando por separado las soluciones para cada conjunto de depósitos abiertos (ver figura 4.4) (es decir, un mayor detalle de lo representado en la figura 4.3) se observa con mayor claridad que no existe dominancia de ninguna solución sobre otra.

Se puede hacer un pequeño resumen de la tabla de resultados teniendo en cuenta qué depósitos son los que van permaneciendo abiertos y cerrados. Veamos como van evolucionando dichas soluciones:

- S1: Los depósitos 1, 2, 9, 11, 13, 15, 17 y 18 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre [4177,48, 4188,358] miles de euros y un impacto entre [9042,091, 9198,465].

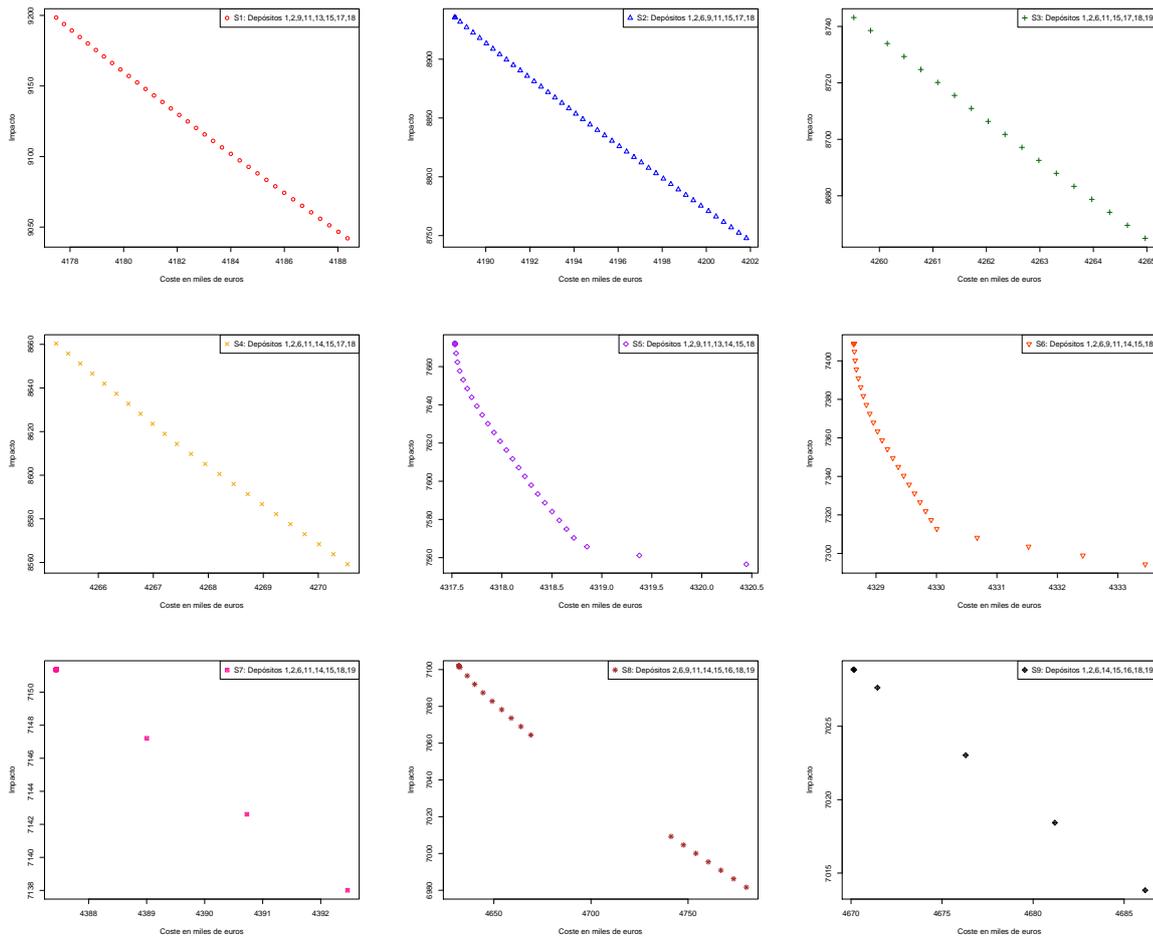


Figura 4.4: Representación gráfica de los experimentos para cada solución (S1-S9)

- *S2*: Los depósitos 1, 2, 6, 9, 11, 15, 17 y 18 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4188,605, 4201,815]$  miles de euros y un impacto entre  $[8747,741, 8935,369]$ .
- *S3*: Los depósitos 1, 2, 6, 11, 15, 17, 18 y 19 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4259,522, 4264,969]$  miles de euros y un impacto entre  $[8664,954, 8743,141]$ .
- *S4*: Los depósitos 1, 2, 6, 11, 14, 15, 17 y 18 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4265,234, 4270,532]$  miles de euros y un impacto entre  $[8559,172, 8660,355]$ .
- *S5*: Los depósitos 1, 2, 9, 11, 13, 14, 15 y 18 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4317,531, 4320,446]$  miles de euros y un impacto entre  $[7556,539, 7672,052]$ .
- *S6*: Los depósitos 1, 2, 6, 9, 11, 14, 15 y 18 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4328,633, 4333,453]$  miles de euros y un impacto entre  $[7294,383, 7408,956]$ .
- *S7*: Los depósitos 1, 2, 6, 11, 14, 15, 18 y 19 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4387,442, 4392,462]$  miles de euros y un impacto entre  $[7138,009, 7151,369]$ .
- *S8*: Los depósitos 2, 6, 9, 11, 14, 15, 16, 18 y 19 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre  $[4632,030, 4669,058] \cup [4741,227, 4779,980]$  miles de euros y un impacto entre  $[7064,421, 7101,952] \cup [6981,635, 7009,231]$ .

- S9: Los depósitos 1, 2, 6, 14, 15, 16, 18 y 19 permanecen abiertos para soluciones con un coste entre [4670,153, 4686,155] miles de euros y un impacto entre [7013,830, 7028,860].

La localización geográfica de estos depósitos se puede ver en el Apéndice B.

### 4.3. Discusión

En la actualidad el hinterland de Valencia tiene 8 depósitos cuya distribución geográfica se puede ver en la figura 4.5.



Figura 4.5: Distribución geográfica de los depósitos actuales

Si se calcula usando el Modelo 3 los valores que tendría las funciones objetivo teniendo en cuenta los depósitos actualmente en funcionamiento, se obtienen los resultados de la tabla 4.3.

Coste	Impacto	Depósitos																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4693,98207	14645,3706	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.3: Solución actual

Esta solución está claramente dominada por las soluciones que hemos obtenido con nuestro modelo, teniendo en cuenta los 11 nuevos depósitos propuestos. El coste obtenido con esta solución está dentro del rango de valores del coste de todas las soluciones que se han obtenido, pero sin embargo, se aprecia que el impacto es muy elevado. La representación gráfica de dicha solución frente a todas las presentadas anteriormente se observan en la figura 4.6:

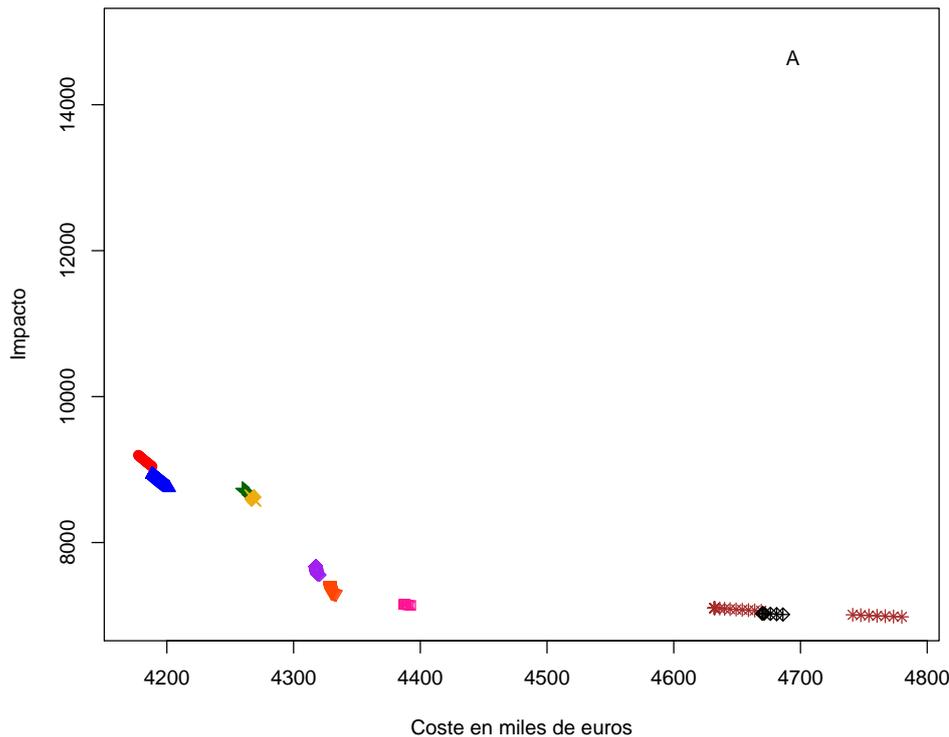


Figura 4.6: Representación de la solución actual (A) frente a la frontera de Pareto obtenida

En los resultados que se han obtenido con un coste aproximado al de la solución actual, se ha conseguido disminuir el impacto generado por las operaciones de transporte un 50 % aproximadamente. Por otro lado, la solución de menor coste que se ha encontrado produciría un ahorro de 500000€ disminuyendo el impacto un 37 % aproximadamente.

Para el conjunto de todas las soluciones eficientes obtenidas el coste se encuentra entre [4177,48, 4779,980]. Se observa que entre las soluciones  $S7$  y  $S8$  se produce un gran salto de coste. Esto es debido a que con el fin de hacer el impacto más pequeño, es necesario abrir un depósito más que hasta el momento. Entre la solución más costosa y la menos costosa se produce una mejora de un 13 % aproximadamente.

En cuanto al impacto, todas las soluciones se encuentran entre [6981,635, 9042,091]. En este caso, el salto más llamativo se produce entre las soluciones  $S4$  y  $S5$ . Esto se debe a que el depósito 17 de la solución  $S4$  tiene un impacto elevado y es uno de los que cierran en la solución  $S5$ . Entre la solución con mayor impacto y la solución con menor impacto se ha conseguido una mejora de un 23 % aproximadamente.

La solución  $S8$  tiene intercalada la solución  $S9$ . En este caso, es más eficiente hacer un cambio de depósitos (cierran los depósitos 9 y 11 y abre el depósito 1) que redireccionar el flujo del transporte entre los depósitos que ya estaban abiertos.

También se ha observado que los depósitos 3, 4, 5, 7, 8, 10 y 12 siempre permanecen cerrados. Todos ellos salvo el depósito 10 están en zonas en las que causan un impacto muy alto, motivo por el cuál no son abiertos.

## Capítulo 5

# Conclusiones y trabajo futuro

En este proyecto se ha estudiado la localización de depósitos de contenedores en un hinterland. El estudio de dicha localización está ligado al coste de mantenimiento de las instalaciones y del transporte de los contenedores entre los clientes, los depósitos y los terminales. Además, se ha estudiado también el impacto ambiental que producen las operaciones de transporte que generan dichos depósitos, al ser este un tema de actualidad y que provoca un gran interés de estudio. Para ello, se ha diseñado un modelo biobjetivo en el cuál se han definido como funciones objetivo la minimización del coste y del impacto.

Para testar el modelo, se eligió como caso de aplicación práctica el del hinterland de Valencia, para lo cuál se contó con la colaboración de la Fundación Valenciaport que aportó los datos necesarios para dicha aplicación práctica. se consideró una muestra de 357 clientes, 19 depósitos y un terminal.

Para la obtención de los costes de transporte se ha utilizado la distancia euclídea entre dos puntos según su latitud y su longitud, multiplicado por el coste por unidad y kilómetro de transporte de un vehículo portacontenedores. Para la obtención de los datos del impacto, debido a la dificultad que existe para su medición, se solicitó la opinión de varios expertos y potenciales vecinos y se desarrolló un procedimiento AHP para cuantificar el impacto por unidad de flujo generado por cada uno de los depósitos alternativos.

Los resultados experimentales se han calculado con el software de optimización LINGO. Los resultados obtenidos mejoran en gran medida la situación actual. El impacto que generan los depósitos que están abiertos en la actualidad es mejorado según el modelo diseñado un 37% aproximadamente para la solución menos costosa, pudiendo alcanzarse una mejora de un 50% en situaciones con un coste similar al actual. Por tanto, el modelo que ha sido diseñado mejora la situación actual aún considerando una segunda función objetivo como es el impacto.

Sin embargo, cabe mencionar que el estudio que se ha hecho podría mejorarse desde un punto de vista de la calidad de los datos si se dispusiera de un mayor número de expertos para la medición del impacto. También se ha de tener en cuenta, que pueden existir otras externalidades a considerar relacionadas con el transporte que también influyan en el impacto y ayuden realizar una mejor medición del mismo.

Otro detalles pendientes que podría ser estudiado en el futuro es la consideración en la función objetivo no sólo del impacto generado por las operaciones de transporte de cada depósito, sino incorporar también el impacto generado por el propio depósito debido al trabajo que se realiza en él (limpieza, reparación, almacenaje de contenedores, etc. . . ).

# Bibliografía

- [1] Levinson, M. (2005). *“The box. How the shipping container made the world smaller and the world economy bigger”*, Princeton University Press.
- [2] Cudahy, B.J. (2006). *“Box boats. How container ships changed the world”*, Fordham University Press.
- [3] Furió, S., Monfort, A., Sapiña, S. (2005). *“La logística del contenedor vacío y el papel de los depósitos de contenedores: capacidad y localización”*, Fundación Valenciaport.
- [4] *“Estudio sobre las necesidades formativas en medio ambiente en hostelería y transporte”*, Instituto Mediterráneo por el Desarrollo Sostenible.
- [5] Tami Toroyan, Margie Peden, (2009). *“La seguridad vial en el mundo Boletín de la Organización Mundial de la Salud”*, 87:736-736. doi: 10.2471/BLT.09.071829.
- [6] Memoria anual Valenciaport (2010).
- [7] Marler, R.T., Arora, J.S. (2004). *“Survey of multi-objective optimization methods for engineering”*, Struct Multidisc Optim 26, 369-395, DOI 10.1007/s00158-003-0368-6.
- [8] Mansfield, E. (1985). *“Microeconomics Theory/Applications”*, 5th edn. New York: W.W. Norton.
- [9] Pareto, V. (1906). *“Manuale di Economica Politica”*, Societa Editrice Libreria, Milan; translated into English by Schwieb, A.S. as *“Manual of Political Economy”*, edited by Schwieb, A.S., Page, A.N. (1971). New York: Kelley, A.M.
- [10] Athan, T.W., Papalambros, P.Y. (1996). *“A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization”*, Eng. Optim. 27, 155-176.
- [11] Chen, W., Sahai, A., Messac, A., Sundararaj, G. (2000). *“Exploration of the effectiveness of physical programming in robust design”*, J. Mech. Des. 122, 155-163.
- [12] Steuer, R.E. (1989). *“Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application”*, Malabar: Robert E. Krieger Publishing.
- [13] Coello Coello, C., Lamont, G., Van Veldhuizen, D. (2007). *“Evolutionary Algorithms for Solving Multi-objective Problems”*, Springer, ISBN 978-0-387-33254-3.

- [14] Hwang, C. L., Md. Masud, A.S., in collaboration with Paidy, S.R., Yoon, K. (1979). *“Multiple objective decision making, methods and applications: a state-of-the-art survey”*, Beckmann, M., Kunzi, H.P. (eds.) Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, No. 164. Berlin: Springer-Verlag.
- [15] Haimes, Y.Y., Lasdon, L.S., Wismer, D.A. (1971). *“On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization”*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. SMC-1, 296-297.
- [16] Goicoechea, A., Duckstein, L., Fogel, M.M. (1976). *“Multiobjective programming in watershed management: A case study of the Charleston watershed”*, Water Resour. Res. 12, 1085-1092.
- [17] Cohon, J.L. (1978). *“Multiobjective Programming and Planning”*, New York: Academic Press.
- [18] Stadler, W. (1988). *“Fundamentals of multicriteria optimization”*, In: Stadler, W. (ed.) *Multicriteria Optimization in Engineering and in the Sciences*, pp. 1?25. New York: Plenum Press.
- [19] Carmichael, D.G. (1980). *“Computation of Pareto optima in structural design”*, Int. J. Numer. Methods Eng. 15, 925-952.
- [20] Miettinen, K. (1999). *“Nonlinear Multiobjective Optimization”*, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [21] Ruiz-Canales, P., Rufian-Lizana, A. (1995). *“A characterization of weakly efficient points”*, Math. Program. 68, 205-212.
- [22] Chankong, V., Haimes, Y.Y. (1983). *“Multiobjective Decision Making Theory and Methodology”*, New York: Elsevier Science Publishing.
- [23] Saaty, Thomas. L. (1994). *“How to make a decision: the analytic hierarchy process”*, University of Pittsburgh.
- [24] Bryson, N. (1996). *“Group decision making and the analytic hierarchy process: Exploring the consensus relevant information content”*, Computers Ops. Res. Vol. 23, No. 1, 27-35.
- [25] Dejax, P., Durand, T., Servant, F. (1986). *“A planning model for loaded empty container ground transportation”*, Paper presented at TIMS/ORSA National Meeting, Los Angeles, 1986.
- [26] Crainic, T.G., Dejax, P.J., Delorme, L. (1989). *“Models for multimode multicommodity location problems with interdepot balancing requirements”*, Annals of Operations Research, 18, 279-302.
- [27] Crainic, T.G., Delorme, L., Dejax, P.J. (1993). *“A branch-and-bound method for multicommodity location with balancing requirements”*, European Journal of Operational Research, 65, 368-382.
- [28] Crainic, T.G., Gendreau, M. Soriano, P. Toulouse, M. (1993). *“A tabu search procedure for multicommodity location/allocation with balancing requirements”*, Annals of Operations Research, Vol. 41, 359-383.

- [29] Crainic, T.G., Delorme,L. (1993). “*Dual-ascent procedures for multicommodity location-allocation problems with balancing requirements*”, Transportation Science, 27, 90-101.
- [30] Gendron, B., Crainic, T.G. (1995). “*A branch-and-bound algorithm for depot location and container fleet management*”, Location Science, Vol. 3, No. 1, 39-53.
- [31] Gendron, B., Potvin, J.Y. Soriano, P. (2003). “*A Tabu Search with Slope Scaling for the Multicommodity Capacitated Location Problem with Balancing Requirements*”, Annals of Operations Research 122, 193-217.



# Apéndices



# Apéndice A

## Tabla de resultados en el cálculo de la frontera eficiente

$\alpha$	Coste	Impacto	Depósitos																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	4177,48193	9198,4654	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9995	4177,77285	9193,8661	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,999	4178,06530	9189,2669	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9985	4178,36308	9184,6677	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,998	4178,66375	9180,0684	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9975	4178,96444	9175,4692	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,997	4179,26512	9170,8700	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9965	4179,56895	9166,2707	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,996	4179,87877	9161,6715	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9955	4180,19183	9157,0723	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,995	4180,50489	9152,4730	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9945	4180,81795	9147,8738	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,994	4181,13256	9143,2746	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9935	4181,44717	9138,6753	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,993	4181,76178	9134,0761	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9925	4182,07640	9129,4769	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,992	4182,39105	9124,8776	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9915	4182,70589	9120,2784	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,991	4183,02195	9115,6792	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9905	4183,33840	9111,0799	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,99	4183,66885	9106,4807	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9895	4184,00031	9101,8815	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,989	4184,33270	9097,2822	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9885	4184,66510	9092,6830	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,988	4184,99749	9088,0838	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9875	4185,32993	9083,4845	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,987	4185,66261	9078,8853	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9865	4185,99529	9074,2861	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,986	4186,32833	9069,6868	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9855	4186,66427	9065,0876	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,985	4187,00022	9060,4884	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9845	4187,33725	9055,8891	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,984	4187,67729	9051,2899	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9835	4188,01734	9046,6907	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,983	4188,35816	9042,0914	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0,9825	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,982	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9815	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,981	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9805	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,98	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9795	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,979	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9785	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,978	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9775	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,977	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9765	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,976	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
0,9755	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0

Tabla A.1: Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada.

$\alpha$	Coste	Impacto	Depósitos																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,975	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9745	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,974	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9735	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,973	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9725	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,972	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9715	4188,60524	8935,3691	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,971	4188,83671	8931,7099	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9705	4189,12869	8927,1106	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,97	4189,42501	8922,5114	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9695	4189,72561	8917,9122	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,969	4190,02630	8913,3129	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9685	4190,32699	8908,7137	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,968	4190,62995	8904,1145	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9675	4190,93810	8899,5152	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,967	4191,25116	8894,9160	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9665	4191,56422	8890,3168	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,966	4191,87728	8885,7175	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9655	4192,19157	8881,1183	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,965	4192,50619	8876,5191	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9645	4192,82080	8871,9198	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,964	4193,13541	8867,3206	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9635	4193,45006	8862,7214	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,963	4193,76474	8858,1221	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9625	4194,08067	8853,5229	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,962	4194,39673	8848,9237	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9615	4194,72451	8844,3244	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,961	4195,05569	8839,7252	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9605	4195,38808	8835,1260	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,96	4195,72048	8830,52674	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9595	4196,05287	8825,9275	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,959	4196,38527	8821,3283	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9585	4196,71793	8816,7290	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,958	4197,05061	8812,1298	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9575	4197,38329	8807,5306	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,957	4197,71893	8802,9313	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9565	4198,05488	8798,3321	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,956	4198,39107	8793,7329	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9555	4198,73111	8789,1336	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,955	4199,07116	8784,5344	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9545	4199,41128	8779,9352	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,954	4199,75471	8775,3359	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9535	4200,09813	8770,7367	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,953	4200,44156	8766,1375	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9525	4200,78498	8761,5383	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,952	4201,12841	8756,9390	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9515	4201,47184	8752,3398	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,951	4201,81526	8747,7406	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	
0,9505	4259,52196	8743,1413	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,95	4259,83502	8738,5421	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9495	4260,14808	8733,9429	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,949	4260,46114	8729,3436	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9485	4260,77539	8724,7444	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,948	4261,09000	8720,1452	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9475	4261,40462	8715,5459	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,947	4261,71923	8710,9467	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9465	4262,03387	8706,3475	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,946	4262,34855	8701,7482	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9455	4262,66445	8697,1490	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,945	4262,98051	8692,5498	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9445	4263,30793	8687,9505	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,944	4263,63908	8683,3513	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9435	4263,97147	8678,7521	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,943	4264,30386	8674,1528	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9425	4264,63626	8669,5536	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,942	4264,96865	8664,9544	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	
0,9415	4265,23353	8660,3551	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,941	4265,45264	8655,7559	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9405	4265,67175	8651,1567	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,94	4265,89087	8646,5574	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9395	4266,10998	8641,9582	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,939	4266,32909	8637,3590	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9385	4266,54820	8632,7597	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,938	4266,76732	8628,1605	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9375	4266,98643	8623,5613	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,937	4267,20554	8618,9620	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9365	4267,42829	8614,3628	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,936	4267,68581	8609,7636	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1								

$\alpha$	Coste	Impacto	Depósitos																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,9355	4267,94388	8605,1643	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,935	4268,20195	8600,5651	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9345	4268,46001	8595,9659	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,934	4268,71808	8591,3666	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9335	4268,97614	8586,7674	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,933	4269,23421	8582,1682	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9325	4269,49341	8577,5689	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,932	4269,75305	8572,9697	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9315	4270,01269	8568,3705	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,931	4270,27234	8563,7712	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,9305	4270,53198	8559,1720	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
0,93	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9275	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,925	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9225	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,92	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9175	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,915	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9125	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,91	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9075	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,905	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9025	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,9	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8975	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,895	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8925	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,89	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8875	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,885	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8825	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,88	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8775	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,875	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8725	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,87	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8675	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,865	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8625	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,86	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8575	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,855	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8525	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,85	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8475	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,845	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8425	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,84	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8375	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,835	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8345	4317,53085	7672,0519	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,834	4317,53199	7671,5201	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8335	4317,54232	7666,9209	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,833	4317,55559	7662,3216	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8325	4317,57828	7657,7224	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,832	4317,61342	7653,1232	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8315	4317,65399	7648,5239	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,831	4317,69809	7643,9247	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8305	4317,74951	7639,3255	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,83	4317,80317	7634,7262	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8295	4317,86026	7630,1270	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,829	4317,92166	7625,5278	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8285	4317,98342	7620,9285	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,828	4318,04518	7616,3293	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8275	4318,10694	7611,7301	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,827	4318,16870	7607,1308	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8265	4318,23046	7602,5316	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,826	4318,29341	7597,9324	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8255	4318,35972	7593,3332	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,825	4318,42991	7588,7339	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8245	4318,50213	7584,1347	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,824	4318,57448	7579,5355	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8235	4318,64683	7574,9362	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,823	4318,71995	7570,3370	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8225	4318,85142	7565,7378	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,822	4319,37551	7561,1385	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0
0,8215	4320,44601																				

$\alpha$	Coste	Impacto	Depósitos																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,82	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8175	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,815	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8125	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,81	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8095	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,809	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8085	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,808	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8075	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,807	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8065	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,806	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8055	4328,63271	7408,9557	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,805	4328,64192	7404,7646	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8045	4328,65431	7400,1654	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,804	4328,67380	7395,5661	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8035	4328,70706	7390,9669	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,803	4328,74756	7386,3677	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8025	4328,78914	7381,7684	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,802	4328,84012	7377,1692	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8015	4328,89643	7372,5700	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,801	4328,95671	7367,9707	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8005	4329,02436	7363,3715	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,8	4329,10025	7358,7723	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7995	4329,18874	7354,1731	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,799	4329,27835	7349,5738	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7985	4329,36797	7344,9746	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,798	4329,45759	7340,3754	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7975	4329,54720	7335,7761	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,797	4329,63682	7331,1769	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7965	4329,72830	7326,5777	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,796	4329,82006	7321,9784	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7955	4329,91181	7317,3792	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,795	4330,00444	7312,7800	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7945	4330,67223	7308,1807	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,794	4331,52334	7303,5815	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7935	4332,42234	7298,9823	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,793	4333,45285	7294,3830	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0,7925	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,792	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7915	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,791	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7905	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,79	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7895	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,789	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7885	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,788	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7875	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,787	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7865	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,786	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7855	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,785	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7845	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,784	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7835	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,783	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7825	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,782	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7815	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,781	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,780	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	4387,44156	7151,3688	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
0,7805	438																				

$\alpha$	Coste	Impacto	Depósitos																		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,774	4632,03042	7101,9523	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7735	4632,03042	7101,9523	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,773	4632,03042	7101,9523	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7725	4632,03042	7101,9523	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,772	4632,58038	7101,2153	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7715	4636,29565	7096,6160	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,771	4640,11471	7092,0168	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7705	4644,42912	7087,4176	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,77	4649,17419	7082,8183	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7695	4654,06001	7078,2191	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,769	4658,94975	7073,6199	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7685	4663,93321	7069,0206	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,768	4669,05763	7064,4214	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7675	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,767	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7665	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,766	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7655	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,765	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7645	4670,15293	7028,8596	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,764	4671,45136	7027,6275	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7635	4676,29836	7023,0283	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,763	4681,19384	7018,4291	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7625	4686,15485	7013,8298	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0,762	4741,22708	7009,2306	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7615	4747,61226	7004,6314	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,761	4754,01381	7000,0321	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7605	4760,42793	6995,4329	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,76	4766,89952	6990,8337	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,7595	4773,42003	6986,2344	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1
0,759	4779,98046	6981,6352	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1

Tabla A.1: Datos para cada una de las soluciones de la frontera encontrada.



## Apéndice B

### Localización geográfica de depósitos

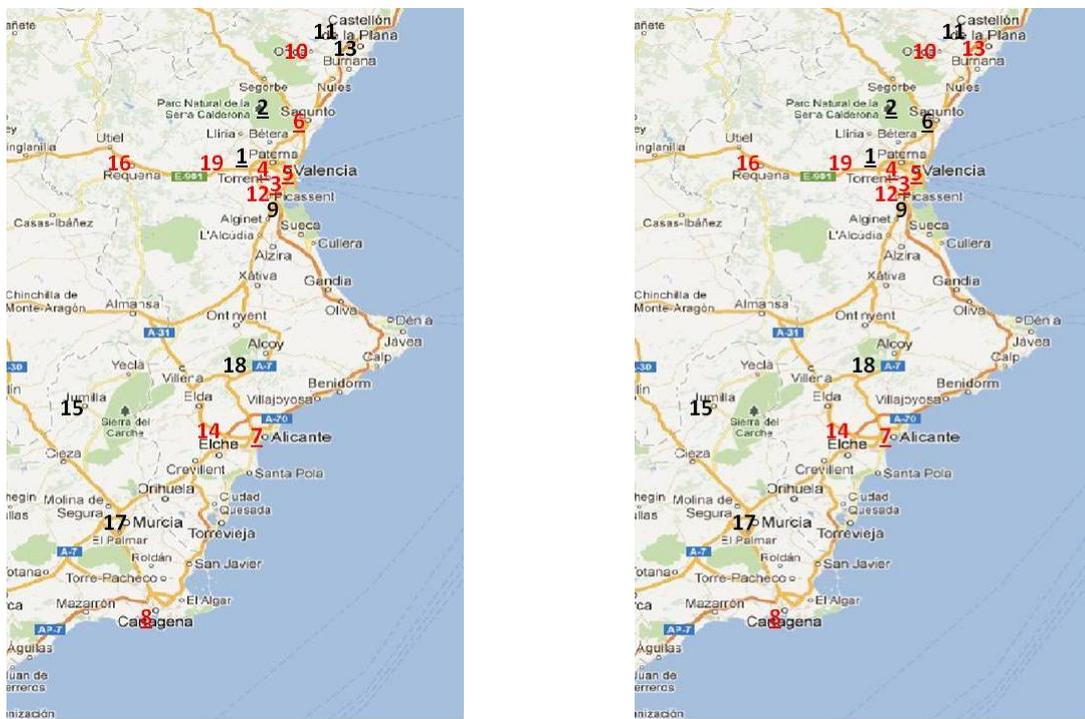


Figura B.1: Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S1 y S2

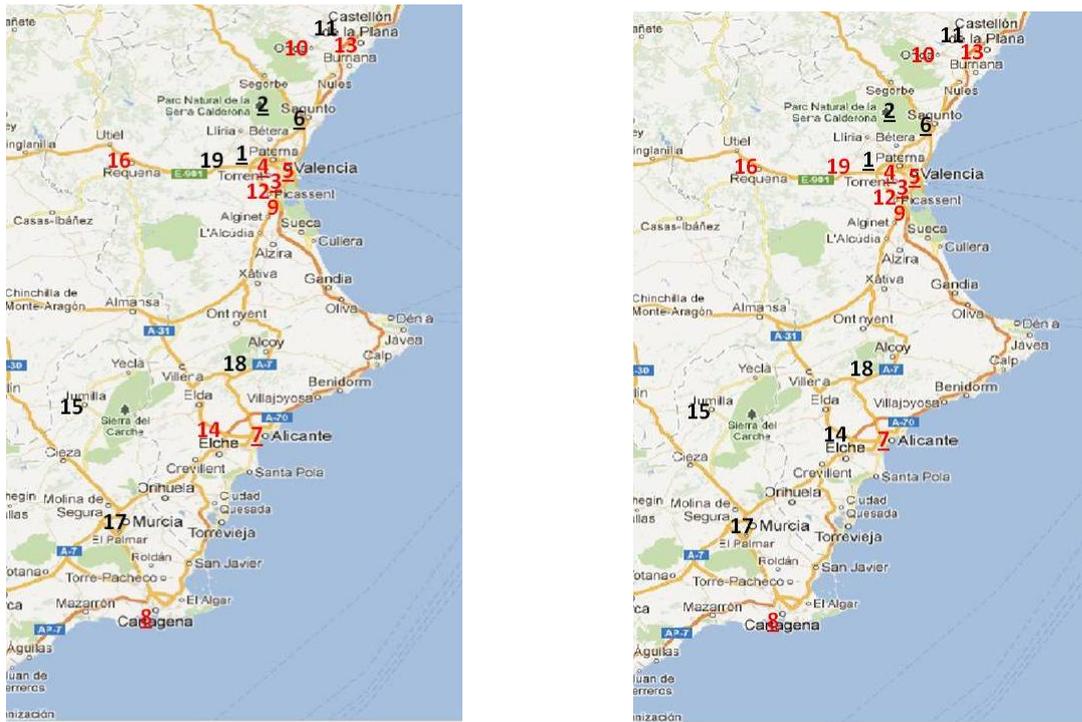


Figura B.2: Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S3 y S4

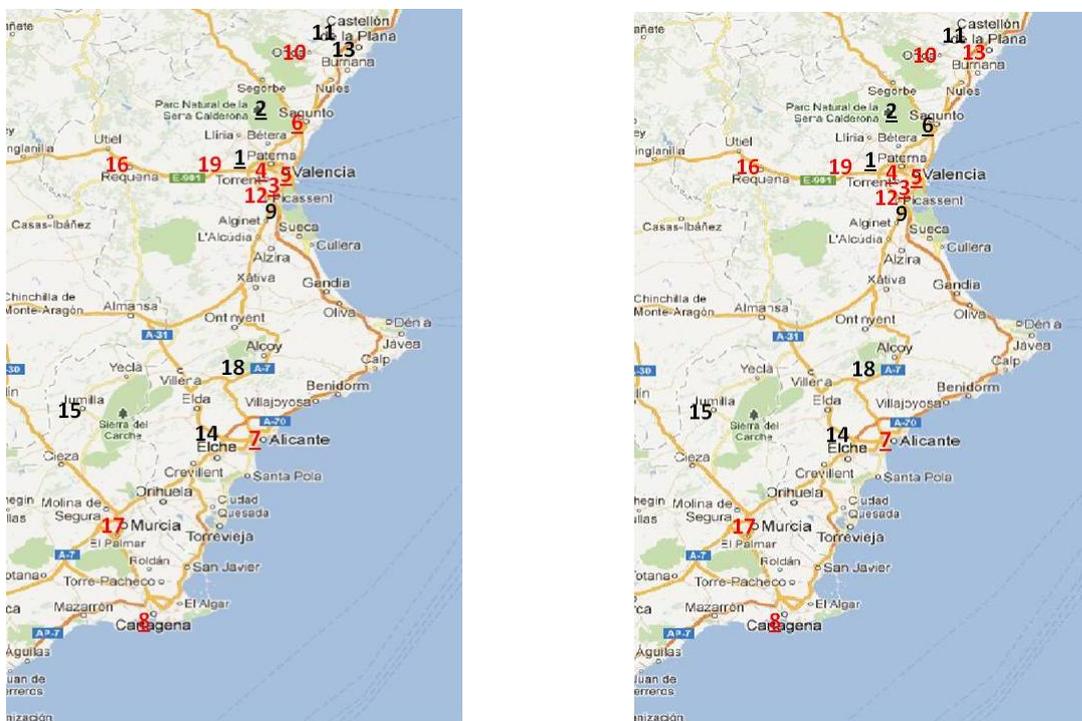


Figura B.3: Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S5 y S6

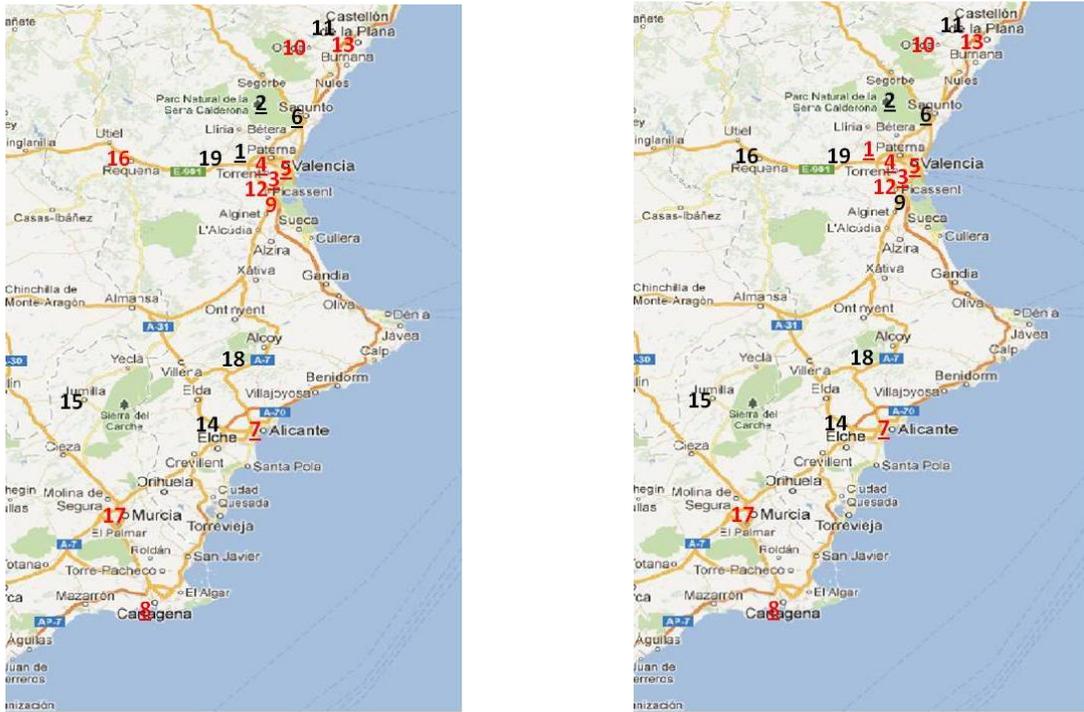


Figura B.4: Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en las soluciones S7 y S8



Figura B.5: Localización de los depósitos abiertos (en color negro) en la solución S9



## Apéndice C

# Código de LINGO

```
! Antonio Palacio Muñiz;
! Proyecto Fin de Máster;

MODEL:

DATA:
    numero_clientes = 357;
    numero_depositos = 19;
    numero_terminales = 1;
ENDDATA

SETS:
    s /1..numero_clientes/;
    d /1..numero_depositos/;
    t /1..numero_terminales/;
    Cap(d):Kd;
    Cosfij(d):fd;
    Exp(s,t):EX;
    Imp(s,t):IM;
    Costest(s,t):CST;
    Costesd(s,d):CSD;
    Costetd(d,t):CTD;
    Impact(d):W;
    flujsd(s,d):XE; ! variables flujo entre s y d (x_sd);
    flujds(d,s):XI; ! variables flujo entre d y s (x_ds);
    flujst(s,t):YE; ! variables flujo entre s y t (x_st);
    flujts(t,s):YI; ! variables flujo entre t y s (x_ts);
    flujdt(d,t):ZE; ! variables flujo entre d y t (x_dt);
    flujtd(t,d):ZI; ! variables flujo entre t y d (x_td);
    depopen(d):delta; ! variable binaria que indica si se usa o no el depósito d;
ENDSETS
```

INIT:

```

alfa=0;
OBJ=0;
lim_impacto=0;
Impacto=0;

```

ENDINIT

DATA:

```

Kd=5000,2000,5000,4500,2000,3800,2500,5000,3800,3800,3800,
3800,3800,3800,3800,3800,3800,3800,3800; !Capacidad depósito;
Kt=25000; !Capacidad terminal;

fd=500,200,500,450,200,380,250,500,380,380,380,380,380,380,380,380,380;
!Coste fijo depósito;
W=@OLE( 'E:\Antonio\Dropbox\Doctorado\Trabajo Fin de Master\Datos\AHP.xlsx');
! !Impacto medioambiental por unidad de flujo en cada depósito;
EX,IM,CST,CSD,CTD=@OLE( 'E:\Antonio\Dropbox\Doctorado\Trabajo Fin de Master\
Datos\Clientes2.xlsx'); !Datos exportación, importación y costes cliente-terminal,
cliente-depósito y terminal-depósito;
alpha=@OLE( 'E:\Antonio\Dropbox\Doctorado\Trabajo Fin de Master\Datos\
Resultados.xls');
@OLE( 'E:\Antonio\Dropbox\Doctorado\Trabajo Fin de Master\Datos\
Resultados.xls')=alfa,lim_impacto,OBJ,Impacto,delta;

```

ENDDATA

!Función Objetivo;

```

[ZOBJ] MIN = @SUM(d(i):fd(i)*delta(i)) +
@SUM(s(i):@SUM(t(j):CST(i,j)*(YE(i,j)+YI(j,i)))) +
@SUM(t(i):@SUM(d(j):CTD(j,i)*(ZI(i,j)+ZE(j,i)))) +
@SUM(s(i):@SUM(d(j):CSD(i,j)*(XE(i,j)+XI(j,i))));

```

!Restricciones;

```

@FOR(t(i):@SUM(s(j):YE(j,i)) + @SUM(d(j):ZE(j,i)) + @SUM(s(j):EX(j,i)) =
@SUM(s(j):YI(i,j)) + @SUM(d(j):ZI(i,j)) + @SUM(s(j):IM(j,i)));

```

```

@FOR(d(i):@SUM(s(j):XE(j,i)) + @SUM(t(j):ZI(j,i)) = @SUM(s(j):XI(i,j)) +
@SUM(t(j):ZE(i,j)));

```

```

@FOR(s(i):@SUM(t(j):YE(i,j)) + @SUM(d(j):XE(i,j)) = @SUM(t(j):IM(i,j)));

```

```
@FOR(s(i):@SUM(t(j):YI(j,i)) + @SUM(d(j):XI(j,i)) = @SUM(t(j):EX(i,j)));

@FOR(t(i):@SUM(s(j):YE(j,i)) + @SUM(d(j):ZE(j,i)) + @SUM(s(j):YI(i,j)) +
@SUM(d(j):ZI(i,j)) <= Kt);

@FOR(d(i):2*(@SUM(s(j):XE(j,i)) + @SUM(t(j):ZI(j,i)))<=Kd(i)*delta(i));

2*(@SUM(d(i):W(i)*(@SUM(s(j):XE(j,i)) + @SUM(t(j):ZI(j,i))))=Impacto;

lim_impacto=0.945*9198.46535467142;

Impacto<=lim_impacto;

alfa=alpha;

OBJ= @SUM(d(i):fd(i)*delta(i)) + @SUM(s(i):@SUM(t(j):CST(i,j)*(YE(i,j)+YI(j,i)))) +
@SUM(t(i):@SUM(d(j):CTD(j,i)*(ZI(i,j)+ZE(j,i)))) +
@SUM(s(i):@SUM(d(j):CSD(i,j)*(XE(i,j)+XI(j,i))));

@FOR(d:@BIN(delta));

END
```