

Un problema de localización y rutas para incineradoras en Andalucía. Obtención de una solución dentro de una frontera eficiente

RAFAEL CABALLERO FERNÁNDEZ, MERCEDES GONZÁLEZ LOZANO y JULIÁN MOLINA LUQUE

Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas)

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Tel.: (+34) 952131168

e-mail: rafael.caballero@uma.es

FLOR M^a GUERRERO CASAS y CONCEPCIÓN PARALERA MORALES

Departamento de Economía

Métodos Cuantitativos e Historia Económica

UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE. SEVILLA

RESUMEN

En este trabajo diseñamos e implementamos un método interactivo para ayudar al decisor en su elección de una solución dentro de una frontera eficiente bastante extensa. Dicho método se presenta como una herramienta simple y eficaz basada en procesos de filtrado y cluster de las soluciones, útil para este tipo de problemática puesto que se basa en la comparación de un número pequeño de soluciones. Con él tratamos de resolver un problema real: la localización de incineradoras de residuos sólidos animales entre diversos lugares preestablecidos de Andalucía junto con la generación de las rutas más adecuadas para la recogida mediante vehículos de los deshechos de los mataderos. El modelo con el que nos enfrentamos es un problema de localización y rutas multiobjetivo de tales dimensiones que resulta difícil la elección del decisor de una solución dentro del conjunto de las eficientes.

Palabras clave: Metaheurísticos, Programación Multiobjetivo, Localización y Rutas.

Solving a Location Routing problem in Andalucía to deliver Animal Residuals. How to obtain a Final Solution among a wide Pareto Front

ABSTRACT

In this paper an interactive method is designed and implemented in order to facilitate the search into a wide set of efficient solutions. This method is based on filtering and clustering tools, and the comparison of a small number of solutions, in an intuitive and simple way for the decision maker. We use this method to solve a real problem: the location of incineration plants (for animal solid residuals) among some candidate locations in Andalucía, as well as the optimal route design to deliver the residuals from each slaughterhouse to the opened plants. The resulting model conforms a Multi-Objective Location Routing problem of such a dimension that the set of efficient solutions obtained can not be managed by the decision maker in order to find his most preferred solution.

Keywords: Metaheuristics, Multi-Objective Programming, Location Routing problems.

Clasificación JEL: JEL: Q53, C61, C63.

* Los autores desean expresar su gratitud a los dos evaluadores anónimos por sus valiosos comentarios, que han permitido completar y mejorar el presente trabajo. Esta investigación está parcialmente financiada por el Ministerio de Educación y Ciencia y la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa de la Junta de Andalucía.

Artículo aceptado para su publicación en febrero de 2008

Artículo disponible en versión electrónica en la página www.revista-eea.net, ref. E-26104.

1. OBJETIVOS, ESTRUCTURA DEL TRABAJO Y FUENTES UTILIZADAS

Es evidente que en los últimos años se ha incrementado el interés por los daños medioambientales generados por los residuos procedentes de actividades económicas diversas lo cual ha dado lugar a un aumento importante del estudio de las medidas que deben adoptarse para tratarlos. Como muestra de la preocupación que provocan estos temas podemos destacar la aplicación de normativas establecidas en los países industrializados con el objetivo de proteger el medio natural y reducir el daño ecológico y personal que pueden ocasionar ciertos procesos. Parte de esta legislación medio ambiental se refiere al transporte y depósito, transformación o eliminación de los residuos, considerándose como un caso particular la gestión de los desechos procedentes de la Enfermedad Espongiforme Transmisible (EET) en la Comunidad Europea.

En la mayoría de actividades ganaderas y explotaciones, se generan restos de animales como consecuencia de las bajas que se producen en la cabaña. Estos restos no se pueden gestionar ni como urbanos ni como peligrosos, por lo que los productores se ven en la situación de falta de servicios en la eliminación de los mismos.

En España se regula la destrucción de los Materiales Específicos de Riesgo (MER), recogiendo en la legislación los tejidos y órganos que se consideran MER de la especie bovina, ovina y caprina. Esto supone un tratamiento específico para la separación y destrucción de los mismos.

Dicha eliminación se deberá realizar mediante incineración llevándose a cabo con las exigencias establecidas en la legislación sobre residuos. Además la eliminación de los restos por medio de incineración se considera como la más factible, económica y viable.

En este trabajo planteamos un modelo que permite la localización de plantas incineradoras de residuos sólidos animales entre diversos lugares preestablecidos. En dichas plantas se incinerarían los restos procedentes de los diversos centros generadores de residuos MER por lo que nuestro modelo de localización debe tener en cuenta la recogida y transporte mediante vehículos de los desechos de dichos centros hacia la incineradora elegida.

A la hora de evaluar las posibles localizaciones para los nuevos centros de tratamiento nos encontramos con distintos criterios a tener en cuenta lo que le confiere a nuestra problemática un carácter multicriterio debiéndose destacar el interés, en los últimos tiempos, por la utilización de modelos de esta naturaleza en problemas de localización de centros con efectos nocivos o no deseados (Erkut y Neuman, 1989, Giannikos, 1998, y Santos *et al.*, 2001).

Por una parte, es evidente que debemos minimizar los costes fijos de la incineradora en los cuales incluimos los costes de instalación y de mantenimiento. Además a este criterio claramente económico le unimos la minimización del coste del transporte de los residuos debiéndose indicar que con el fin de homogeneizar los periodos de los dos tipos de coste tomamos para todos el periodo semanal.

Por otra parte, las operaciones realizadas con estos residuos llevan asociadas un riesgo, lo cual genera un rechazo social, cuya incorporación en los modelos de transporte y localización se ha realizado de formas diversas. El riesgo percibido aparece en la bibliografía de localización y rutas definido de varias formas: según Erkut y Verter (1995, 1998) como el riesgo individual multiplicado por una potencia de la población, donde el riesgo individual puede venir expresado en función de las probabilidades de incidente y sus consecuencias; según Giannikos (1998) como la cantidad de producto transportada por el núcleo de población o de alguna otra manera.

Nosotros tratamos de minimizar en nuestro modelo el rechazo social, distinguiendo, por un lado, el correspondiente a las poblaciones por donde discurren los vehículos en su ruta hacia la incineradora, el cual lo obtenemos multiplicando el número de vehículos que pasan a través de un centro de población por el número de habitantes del mismo y, por otro lado, el rechazo de las poblaciones cercanas a la incineradora, denominado desutilidad colectiva, el cual es una función creciente del tamaño del centro que se desea instalar y decreciente de la distancia del centro a la población correspondiente.

Por otra parte, también debemos tener en cuenta, en este tipo de problemática, criterios de equidad, entendiéndolo por ella la distribución del daño entre la población afectada de forma igualitaria (Marsh y Schilling, 1994). Así, como medida de equidad minimizamos el rechazo social máximo el cual, como su nombre indica, corresponde a aquella población que se ve más afectada por el transporte de los residuos para su eliminación posterior.

Sabemos que cuando nos enfrentamos con diversos criterios el concepto de solución óptima usado en problemas mono-objetivo se convierte en el concepto de solución eficiente, y en lugar de encontrar una sola solución, se busca un conjunto de soluciones que conforman la denominada frontera de Pareto.

Pero por otra parte, una vez planteado el problema observamos que, desde el punto de vista computacional, nos enfrentamos por un lado con las dificultades características de los problemas combinatorios y, por otro, con las dificultades correspondientes a la multiplicidad de objetivos, unido a las importantes dimensiones que puede alcanzar el problema si tenemos un número elevado de centros generadores y de localizaciones. Todas estas razones imposibilitaba su resolución por los métodos multiobjetivos exactos por lo que vimos conveniente generar un metaheurístico para proporcionar, en un tiempo computacional razonable, una aproximación de la frontera eficiente.

Pero, en muchas ocasiones, dicha aproximación supone un conjunto de soluciones lo suficientemente grande como para que al decisor resulte difícil elegir entre ellas. En tales casos es insuficiente la determinación o aproximación de la frontera eficiente, sino que es necesario incorporar las preferencias del decisor para determinar cuál de estos puntos es el que mejor representa estas preferencias.

Métodos para resolver este problema pueden encontrarse en enfoques Interactivos Multiobjetivo (véase Miettinen, 2002 y Steuer, 1986), que asumen que el deci-

El decisor es capaz de proporcionar un feedback consistente sobre sus preferencias el cual se incluye de alguna manera en el proceso de resolución. Esta interacción puede guiar una búsqueda hacia las zonas más preferidas de la frontera de Pareto obtenida evitando explorar soluciones no interesantes.

El modelo resultante lo aplicamos al caso de la comunidad andaluza donde analizamos seis posibles localizaciones y 53 mataderos generadores de residuos enfrentándonos con un problema de localización y rutas multiobjetivo de importantes dimensiones del cual obtuvimos 2499 soluciones eficientes siendo imposible para un decisor real elegir una entre ellas por lo que le presentamos el método interactivo generado para guiarle a la solución más preferida.

En el siguiente epígrafe plantaremos la formulación general de nuestro modelo mostrando posteriormente, en el tercer apartado, tras su resolución por el metaheurístico, el método interactivo generado para ayudar al decisor en su proceso de elección. Tras ello mostraremos los resultados obtenidos en nuestra aplicación al caso de la comunidad andaluza, y cerraremos el trabajo con las conclusiones más relevantes del mismo.

2. FORMULACIÓN DEL MODELO

Nuestro problema consiste en recoger los residuos MER generados por los n elementos pertenecientes al conjunto I de mataderos, y transportarlos a las incineradoras las cuales deben estar ubicadas en algunas de las s localizaciones candidatas para la instalación de las mismas, localizaciones que conforman el conjunto J . En dicho transporte atravesamos diversos centros de población, elementos del conjunto H .

Un vehículo puede pasar por varios mataderos, recogiendo en todos ellos sus residuos (hasta completar la capacidad del vehículo), lo cual supone una complejidad importante puesto que aumenta las posibles combinaciones siendo nuestro propósito organizar las rutas para cada vehículo con el punto de partida y llegada, la incineradora elegida, considerando la jornada del transportista, el tiempo de carga y descarga y teniendo en consideración ventanas de tiempo. Así el transporte de los residuos se realiza mediante r rutas (que conforman el conjunto R) realizadas por r vehículos con una capacidad máxima C_{Max} y en un tiempo menor que T_{Max} .

Este proceso de formalización del problema, via rutas, hace complicada su expresión en forma analítica, y las condiciones que aparecen expuestas anteriormente, han sido incluidas en la construcción de las distintas rutas. Para calcular las rutas debemos tener en consideración la cantidad de residuos de cada centro generador. Si esta excede la capacidad de un vehículo es necesario desdoblar ese centro en varios nodos (tantos como vehículos sean necesarios para transportar sus residuos).

En cuanto a las variables de nuestro modelo consideraremos las variables binarias y_j , referentes a la instalación de las incineradoras

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si se instala en } j \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

En cuanto a los objetivos del modelo tenemos los siguientes:

- 1) Minimizar los costes fijos.

$$\min \sum_{j=1}^s (\xi_j + v_j) \cdot y_j,$$

donde ξ_j son los gastos correspondientes a la instalación de una planta incineradora en la localización j ($j = 1, \dots, s$) y v_j representa el coste de mantenimiento de una incineradora en la localización j ($j = 1, \dots, s$).

- 2) Minimizar el coste de transporte:

$$\text{Min} \sum_{r \in R} \text{Cost}(r) = \text{Min} \sum_{r \in R} c d_r,$$

donde

c = coste por km.

d_r = distancia recorrida en la ruta r .

- 3) Minimizar el rechazo social:

$$\text{Min} \sum_{r \in R} \text{Rechazo}(r) = \sum_{r \in R} \sum_{h \in H(r)} \omega_h,$$

donde

ω_h = número de habitantes de la población h .

$H(r)$ = conjunto de las poblaciones por las que atraviesa la ruta r .

- 4) Criterio de distribución del riesgo (minimizar el riesgo máximo).

$$\text{Min} \text{Max}_{h \in H} \{ \text{Riesgo}(h) \} = \text{Min} \text{Max}_{h \in H} \{ \omega_h n_h \},$$

donde

n_h = número de camiones que atraviesan la población h .

Para determinar cuál es el valor que nos da el riesgo máximo, entre todas las poblaciones por las que se pasa para llegar a la posible localización, se ha tomado aquella que tiene un mayor rechazo social (Santos *et al.*, 2001).

5) Minimizar la desutilidad colectiva

$$\text{Min} \sum_{h \in H} \omega_h E_h \quad \text{siendo} \quad E_h = \sum_{j \in J} \frac{\gamma y_j}{\delta_{hj}}, \quad \delta_{hj} \leq \theta_1$$

donde

γ = capacidad de la incineradora

δ_{hj} = distancia de la población h a la localización de la incineradora j .

Con ella pretendemos recoger el rechazo de las poblaciones cercanas a la incineradora, entendiendo por cercana el encontrarse a una distancia de la ubicación de la incineradora inferior o igual a θ_1 , umbral que hemos situado en 10 km, entendiendo que si una población está a una distancia por encima de dicho umbral, ese aspecto de rechazo social no se considera. Por consiguiente, la desutilidad colectiva es una función creciente de la capacidad de la incineradora que se desea instalar, y decreciente de la distancia del centro a la población correspondiente, δ_{hj} (Giannikos, 1998).

En cuanto a las restricciones del modelo tenemos, además de las señaladas anteriormente dos adicionales: la primera viene dada porque el número máximo de incineradoras que se pueden abrir dentro de las posibles localizaciones es de dos, y la segunda, por el hecho de que todos los residuos generados por los mataderos deben ser recogidos e incinerados.

3. RESOLUCIÓN DEL MODELO

Una vez formulado el problema observamos que desde el punto de vista matemático, estamos tratando con un problema Multiobjetivo de Optimización Combinatoria (MOCO). En nuestro caso se unen las dificultades características de un problema combinatorio con las dificultades que provienen de la multiplicidad de objetivos.

En cuanto a los aspectos técnicos del modelo, es decir, su formulación y resolución, hemos de señalar en primer lugar que nos enfrentamos a un problema multi-

objetivo de Localización y Rutas (MLR) con cinco objetivos, en el cual no sólo buscamos cuáles deben ser las mejores localizaciones para ubicar las incineradoras entre las posibles candidatas, sino que además queremos conocer cuáles deben ser las rutas óptimas (determinando qué mataderos se van a encontrar en ella) de forma que se minimicen tanto los criterios económicos como los sociales.

En un problema de este tipo (MLR), lo que se persigue es localizar una serie de plantas (localizaciones) que han de satisfacer la demanda de una serie de clientes (nodos) de forma que se minimicen los costes fijos ocasionados por estas plantas/localizaciones y los costes de transporte debidos a satisfacer las demandas de cada uno de estos clientes/nodos, además de los costes sociales.

En la literatura, podemos encontrar problemas de localización y rutas (LR) con un único objetivo en el que se consideran sólo los costes económicos (véase, por ejemplo, Albareda-Sambola *et al.*, 2005). Incluyendo varios objetivos, podemos encontrar algún trabajo relacionado con el problema de localización, pero no con el problema de rutas (Fernández y Puerto, 2003).

En la práctica, debido a la dificultad computacional para resolver este tipo de problema, aún en el caso de un sólo criterio económico, en ocasiones se ha recurrido a resolver independientemente el problema de localización y el de rutas.

Tal y como se señala en Albareda-Sambola *et al.* (2005), resolver en dos fases este problema: una primera para determinar las plantas que han de abrirse (localización) y una segunda para determinar las rutas óptimas para visitar cada uno de los clientes (Rutas), es en la mayor parte de los casos reales inoperante. Esto es debido a que en este tipo de problemas, el coste de transporte (es decir, el coste ocasionado por satisfacer la demanda de cada uno de los clientes) es en general determinante, lo cual no permite resolver separadamente el problema de localizar las incineradoras (según alguna aproximación de lo que serán los costes de transporte) y, a continuación resolver el problema de rutas para satisfacer los clientes, puesto que una mala elección de las localizaciones en la primera fase (donde no se tienen en cuenta las rutas) determina unos costes de transporte muy alejados del coste óptimo para la segunda fase. Es decir, para resolver eficientemente este problema ha de plantearse el modelo en una única fase, el modelo de localización y rutas. Por esta razón, en estos últimos años los problemas LR han tenido una especial atención en la literatura, como puede apreciarse en Min *et al.* (1998).

En nuestro caso nos enfrentamos a un problema con múltiples objetivos, lo cual requiere realizar múltiples resoluciones para obtener una aproximación de la frontera eficiente, donde cada resolución ofrecería un punto eficiente. Por otra parte, es un hecho conocido que para este tipo de problemas (problemas Multiobjetivo de Optimización Combinatoria) parte de estos puntos eficientes son no-soportados y su obtención mediante un método exacto requiere añadir restricciones al modelo original (véase por ejemplo Gandibleux y Freville, 2000), lo cual aumenta aún más su coste computacional. Por las condiciones reales del problema, hemos de añadir también una limitación en la duración en tiempo de cada una de estas rutas, puesto que la jornada laboral de los camioneros encargados de recoger estos residuos es

de 8 horas y el tiempo de carga de media hora, lo cual complica de nuevo el problema a resolver. Todo ello nos lleva al empleo para su resolución de un método metaheurístico.

En concreto el método que nosotros utilizamos, MOAMP (Caballero *et al.*, 2004) trata de adaptar una Búsqueda Tabú (Glover y Laguna, 1997) a la estructura particular del conjunto eficiente de un problema multiobjetivo. En este sentido, y en el caso de fronteras eficientes conexas, los puntos eficientes de un problema multiobjetivo se encuentran “conectados” entre sí, es decir, en el caso en que las variables del problema sean continuas, cualesquiera dos puntos eficientes están conectados por una curva dentro del conjunto eficiente, y en el caso en que las variables del problema sean enteras, cualquier punto eficiente está “suficientemente cerca” de otro punto eficiente. En este último caso, por “suficientemente cerca” se entiende que en un vecindario no demasiado amplio de este punto eficiente se puede encontrar otro punto eficiente. Este principio de proximalidad de los puntos eficientes de un problema multiobjetivo es la propiedad que se intentará rentabilizar en el método MOAMP. Así, se tratará de generar mediante una serie de Búsquedas Tabú un conjunto de puntos eficientes inicial y a través de ellos se intentará conseguir una buena aproximación del resto mediante un proceso de intensificación.

Con su uso se pueden generar una gran cantidad de posibles soluciones, tantas que al decisor le sea difícil elegir entre ellas, por ello nos surge la necesidad de introducir un método interactivo para guiarle a la solución más preferida.

Debemos decir que el número de métodos interactivos utilizados en el campo de los metaheurísticos Multiobjetivo es reducido en contraste con el número de interactivos usados conjuntamente con los métodos tradicionales o exactos.

Sólo unos pocos trabajos pueden ser encontrados combinando métodos metaheurísticos multiobjetivo y métodos interactivos: en Alves y Climaco (2000) tenemos la búsqueda Tabú y el método de temple simulado, en Ulungu *et al.* (1998) y Hapke *et al.* (1998) un método de temple simulado y en Coello (2000) encontramos un amplio estudio incluyendo las preferencias cuando se usa un método multiobjetivo evolutivo.

Nosotros presentamos un método interactivo en el cual la forma en que se realiza la interacción con el decisor es muy simple, puesto que sólo tiene que elegir una solución entre un conjunto pequeño de ellas. En el siguiente subapartado pasamos a exponer el mismo.

3.1. Método interactivo

En esta sección describimos un método interactivo para elegir una solución dentro de la frontera de Pareto. Asumimos las siguientes características en nuestro problema:

- Tenemos un conjunto Ω_0 con M soluciones eficientes $\{s_i : i = 1, \dots, M\}$.
- Cada una de ellas es evaluada de acuerdo a p criterios.
- Cada una de ellas es evaluada de acuerdo a n aspectos relevantes.

Esto es, cada solución s_i consiste en un conjunto de p valores de las funciones objetivos f_j y un conjunto de n valores relevantes ind_j :

$$s_i = (f_1, \dots, f_p, ind_1, \dots, ind_n)$$

El conjunto de aspectos relevantes no se consideran como criterios, pero ofrecen algún tipo de información que el decisor considera útil para tomar una decisión.

Ahora, queremos diseñar la interacción con el decisor para reducir el tamaño de la frontera de Pareto y guiarlo a la solución preferida en este conjunto. Pero queremos tener en cuenta que las formas en que un decisor puede proporcionar información pueden ser mucho más diversas que las usadas dentro de los métodos interactivos metaheurísticos. Así, por ejemplo, en muchos casos el decisor puede que no sea capaz de proporcionar niveles para todos los objetivos, lo cual es el enfoque más popular usado en los metaheurísticos. De hecho, los métodos interactivos usualmente se clasifican de acuerdo con el tipo de información solicitada al decisor en cada interacción: pesos locales, *trade-offs* locales, puntos de referencia, etc. Pero la forma en que se realiza la interacción no se restringe a proporcionar información, al decisor se le puede pedir que escoja una solución entre un conjunto de soluciones dado, o que realice comparaciones por pares en él, o que enumere los objetivos que serán mejorados o sacrificados, y mucho más. Esto es, el esquema de la interacción puede ser diseñado de muchas otras maneras.

Nosotros queremos presentar un método Interactivo Posterior al método Metaheurístico MultiObjetivo (*i*-PMOM) de modo que la interacción con el decisor lo lleve a escoger una solución entre un conjunto de soluciones. El término posterior se refiere al hecho de que este método se utiliza una vez que se han obtenido todas las soluciones usando un metaheurístico multiobjetivo, aunque no depende del método metaheurístico utilizado en la obtención de las soluciones. Una vez que se obtengan estas soluciones, con este método interactivo proporcionaremos dos herramientas para reducir el número de las soluciones posibles que se elegirán: filtrado y cluster. Cada uno de ellas desempeñará un papel en este método.

(a) Filtrado:

- Con esta primera herramienta permitimos al decisor eliminar aquel conjunto de soluciones que no le resulta interesante. Una vez que el decisor observa qué parte de la frontera eficiente no le satisface, puede usar un filtrado para eliminar las soluciones correspondientes de posteriores consi-

deraciones. Esto se consigue simplemente proporcionando algunos niveles para los criterios o aspectos relevantes. Esta herramienta resulta muy útil en los primeros pasos del procedimiento, donde el decisor puede notar que algunas soluciones extremas pueden no tener lógica en una situación real.

- Así, en cualquier iteración puede ser utilizado el proceso de filtrado siguiendo el siguiente esquema:

ITERACIÓN T: FILTRADO

- Proporcionar niveles a los criterios o aspectos relevantes deseados.
- Suprimir las soluciones que no cumplan alguno de los nuevos niveles.
- Incluir las soluciones restantes en el conjunto Ω_{t+1} .

(b) Cluster:

- Esta es la base del método interactivo. Lo que intentamos hacer es mostrar al decisor un número ($Cl > p$) de soluciones de referencia (que llamaremos Conjunto de Referencia) para que escoja la más preferida. Esas soluciones de referencia, en la iteración t constituirán el conjunto RS_t , y jugarán el papel de representantes de un cluster. El resto de soluciones serán clasificadas de acuerdo a este conjunto, esto es, cada solución será asignada al cluster cuyo representante esté más cercano a ella (donde la distancia considerada será la euclídea). Así, el conjunto de soluciones eficientes se divide en Cl grupos correspondientes a los Cl clusters, y donde cada grupo tiene un representante constituido por su solución de referencia. En este momento se muestra al decisor este conjunto, donde elige la solución que más se ajusta a sus preferencias, y con esta información se marca la solución de referencia más lejana a esta elección, y se elimina junto con todas las soluciones asociadas a ella (todo su cluster). Es decir, se eliminan las soluciones que están más lejos de las preferidas por el decisor. El resto de soluciones son incluidas en el conjunto Ω_{t+1} para la próxima iteración.

ITERACIÓN T: CLUSTER

I.	Construir el conjunto de referencia RS_t .
	↪ Elegir las mejores soluciones para los p criterios.
	↪ Incluir las en RS_t .
	↪ Mientras que el número de soluciones es más pequeña que Cl , haz:
	• Escoge la solución que maximiza la distancia (euclídea) a RS_t .
	• Inclúyela en RS_t .
	↪ Fin.
II.	Permitir que el decisor escoja la solución más preferida en RS_t .
III.	Eliminar las soluciones del cluster más lejano.
IV.	Incluir el resto de soluciones en el conjunto Ω_{t+1} .

El método completo es como sigue:

Paso 1.

A partir del conjunto Ω_0 construye el conjunto de referencia inicial, RS_0 y muéstralo al decisor.

Paso 2.

Si el decisor quiere hacer un cluster, ve al **Paso 3**.

Si el decisor quiere hacer un filtrado, ve al **Paso 4**.

Si el decisor está satisfecho con la solución más preferida, ve al **Paso 5**.

Paso 3.

Realiza un cluster, construye el próximo conjunto de referencia RS_{t+1} , ir al **Paso 2**.

Paso 4.

Realiza un filtrado, con el conjunto de soluciones restantes Ω_{t+1} , construye el siguiente conjunto de referencia RS_{t+1} y ve al **Paso 2**.

Paso 5. Fin.

4. APLICACIÓN AL CASO DE ANDALUCÍA

En esta sección vamos a presentar una aplicación de nuestro modelo al caso de la comunidad andaluza. En cuanto a las posibles localizaciones debemos indicar que se han elegido un total de seis: Antequera por ser el centro geográfico de Andalucía, Aznalcóllar y Alquife por ser poblaciones en las que se ha producido un gran número de desempleados, en su mayor parte transportistas y reparadores de maquinaria, debido al cierre de minas. Olvera y Alcalá la Real por su situación de proximidad entre varias provincias andaluzas y Osuna por estar localizada en ella una planta transformadora de subproductos animales no incineradora, analizando así si dicha localización resulta adecuada o no para la instalación de una planta incineradora como la que planteamos en este trabajo. Además, es una localidad que está bien comunicada por carretera lo que podría facilitar el transporte de los residuos.

En cuanto a los centros generadores de residuos MER hemos considerado los 53 mataderos que en el momento de realizar el estudio existían en Andalucía. Dichos mataderos han generado 99 nodos puesto que recordemos que cuando en un matadero la cantidad de residuos supera la capacidad de carga de un vehículo (que hemos supuesto en 3500 kg) dicho centro se desdobra en tantos nodos como vehículos hagan falta para el transporte de sus residuos.

Por otra parte hemos considerado el análisis de la localización de hasta dos incineradoras porque, aunque debido a la capacidad máxima de las incineradoras y a la cuantía de residuos en Andalucía, una única incineradora sería suficiente para lograr la destrucción de los residuos semanales de los mataderos andaluces, es posible que la instalación de una segunda sea aconsejable económicamente puesto que pueden reducirse costes económicos y sociales y, a la vez, es posible ofrecer los servicios de las incineradoras instaladas a comunidades autónomas vecinas con el beneficio económico resultante.

Con estas características el problema alcanzaba unas dimensiones tales que no existía precedentes en la literatura. Para resolverlo aplicamos el método metaheurístico previamente comentado y obtuvimos 2499 soluciones (Caballero et al., 2007), número bastante elevado como para que al decisor le fuera fácil elegir una de ellas. De hecho, en nuestro caso, el decisor se declaró incapaz de tomar una decisión ante tal número de soluciones, y por ello le presentamos el método interactivo propuesto.

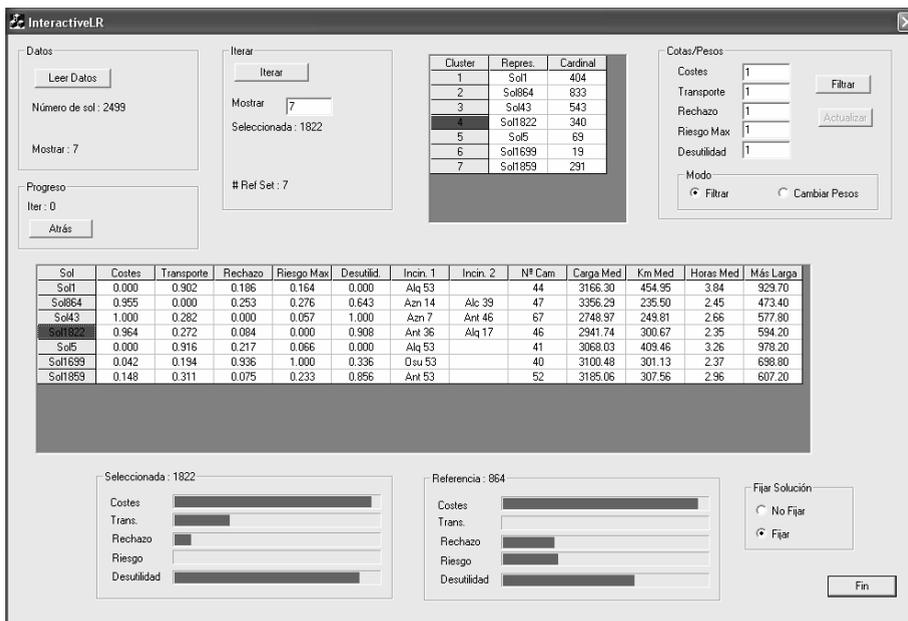
Para llevar a cabo este proceso de interacción con el método i-PMOM se diseñó e implementó un software con ciertas herramientas gráficas para ayudar al decisor. Esta implementación fue hecha para entorno Windows XP usando el lenguaje C++.

Para realizar la elección de una solución final al decisor se le mostraba, de cada solución, el valor alcanzado por las funciones objetivo y además una serie de datos como las incineradoras abiertas, el número de mataderos atendidos por cada planta o el número de vehículos (camiones) usados en cada solución así como algunas características más requeridas por el decisor como son la carga media de los vehículos, la media de los kilómetros recorridos, la media de las horas transcurridas en

las rutas así como el número de kilómetros de la ruta más larga. Los valores de la función objetivo que se muestran están normalizados en el intervalo (0, 1), siendo el 0 el mejor caso y 1 el peor, para que resulte más fácil realizar las comparaciones.

Entonces en cada iteración el decisor puede ver una ventana como se muestra en la figura siguiente:

FIGURA 1



Como podemos observar en la figura 1, el número de soluciones mostradas se fijó en 7 (el parámetro CI). También se puede observar el número de soluciones asignadas a cada cluster así como el representante de cada cluster. Para cada uno de estos representantes se muestran los valores de la función objetivo y la información relevante en la tabla central

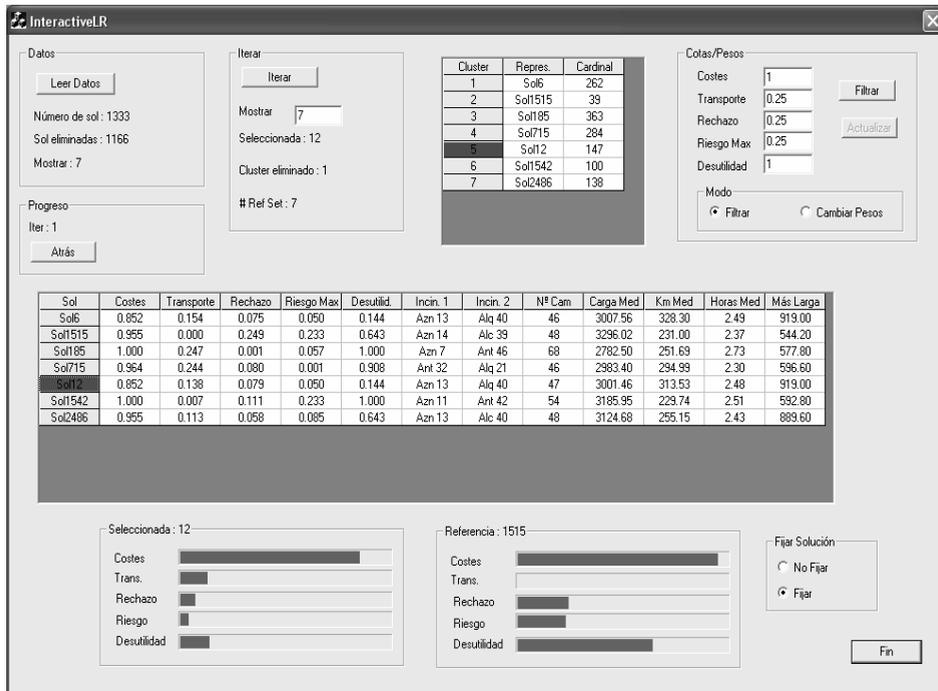
Para ayudar al decisor a comparar las soluciones, el software incorpora un diagrama de barras donde pueden ser representados los valores de la función objetivo (normalizados) de dos soluciones seleccionadas. Una de estas soluciones puede ser elegida como solución de referencia y de esta manera compararla fácilmente con alguna otra de posteriores iteraciones. Además, en el cuadro superior derecho, el software no sólo permite al decisor proporcionar niveles para el filtrado sino también cambiar los pesos para incrementar la importancia relativa de algunos criterios.

Una vez analizada la información, el decisor puede escoger una de las siete soluciones como la más preferida, al iterar se elimina el cluster más lejano y por tan-

to todas las soluciones asignadas a él. Se muestran siete nuevos representantes y se implementa una nueva iteración.

A continuación describimos el proceso interactivo llevado a cabo con el decisor usando este software. Nuestro decisor fue un representante del mundo empresarial bastante concienciado con los problemas sociales por lo que sus criterios claves eran el coste de transporte, el rechazo social y el riesgo máximo. Por ello, al observar la pantalla anterior (figura 1) donde aparecen, entre otras, como primeras soluciones aquellas donde se alcanza el mínimo de cada una de las funciones objetivo, comparó la que obtenía el mínimo del transporte, con la que alcanzaba el mínimo del rechazo y la del riesgo máximo y de este primer análisis consideró que la que alcanzaba el mínimo del riesgo máximo (sol1822) era preferida para él a la que minimizaba el rechazo (sol43), pero no satisfecho con ello y dado que su elección se basaba mucho en los criterios mencionados decidió filtrar las soluciones quedándose con aquellas en las que dichos criterios, prioritarios para él, no superaran un valor de 0.25, obteniéndose al iterar los resultados mostrados en la siguiente pantalla:

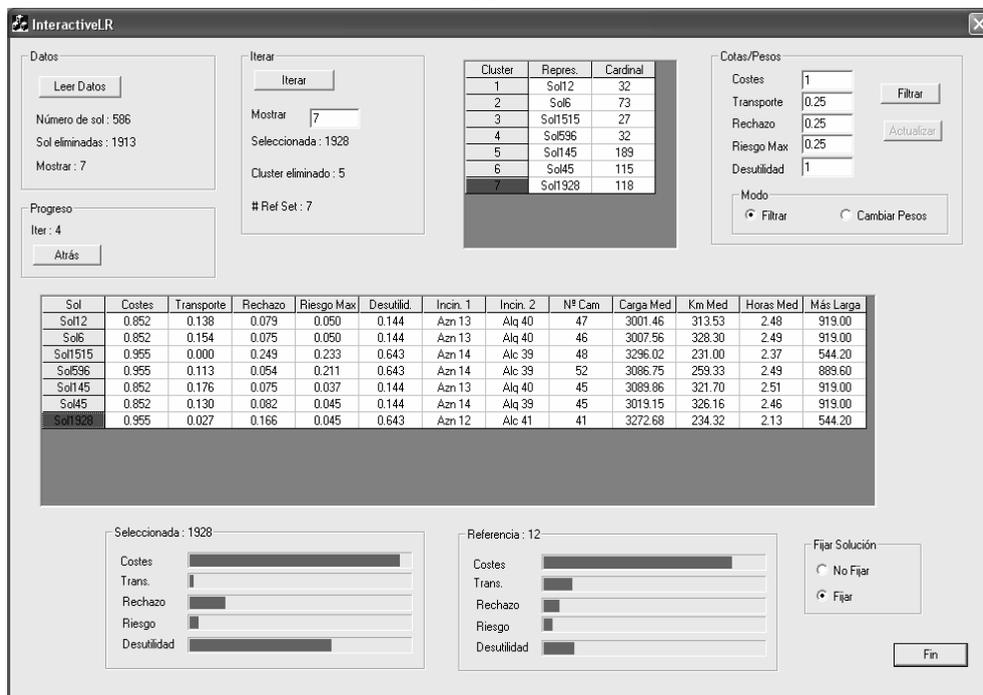
FIGURA 2



Observamos que el número de soluciones se redujo de 2499 que existían en un principio a 1333. De entre ellas se fijó en la solución 12 en la que aparece un mejor

equilibrio, según él, entre los tres criterios que tiene más en consideración. Vemos cómo al compararla con la que alcanza el mínimo en el transporte, sol 1515, conseguimos un menor rechazo y riesgo máximo a cambio de empeorar poco en transporte (un 13.8%). Tras realizar varias iteraciones en las que mantiene la misma solución indicada, llegamos a una situación, representada en la figura 3, en la que decide cambiar de solución, puesto que, aunque empeoramos en rechazo y desutilidad, consideró que la bajada en el coste de transporte (pasamos de 0.138 a 0.027) lo justificaba por lo que se fijó en la sol1928.

FIGURA 3



Tras varias iteraciones decidió filtrar más las soluciones y reducir el conjunto a aquellas que no superaran 0.15 en el coste de transporte, rechazo y riesgo máximo, y 0.3 en la desutilidad. Tras realizar este filtrado (figura 4) y observar las soluciones representantes, donde en todas se instalaban 2 incineradoras en las mismas localizaciones (una en Aznalcóllar y otra en Alquife) por lo que los costes fijos y la desutilidad eran iguales y dado que las diferencias en los valores alcanzados en los otros tres criterios eran pequeñas decide fijarse en las otras características (nº camiones, carga, etc...) quedándose con la sol206.

Dicha elección viene propiciada por el hecho de que con ella conseguimos utilizar un número de camiones no muy grande, 45, estando mejor aprovechados

puesto que la carga media de los mismos, 3152.50, es mayor que el de todas las demás soluciones mostradas, y el número medio de horas de las rutas, 2.30, es la menor de todas.

Una vez escogida esta solución el decisor se muestra satisfecho y ésta es su solución más preferida dándose por terminado el proceso interactivo.

FIGURA 4



5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado un proceso de interacción útil para situaciones donde tenemos que seleccionar una alternativa entre un conjunto de soluciones obtenidas previamente por cualquier método, especialmente por el uso de métodos metaheurísticos, y donde el decisor necesita ayuda para encontrar su solución más preferida en este conjunto. En concreto, y para su aplicación, nosotros planteamos un modelo de localización y rutas multiobjetivo de dimensiones tales que no existen precedentes en la literatura. Dicho modelo es válido para la localización de

diversos centros a los cuales deben llevar bienes no deseados procedentes de distintos generadores debiéndose indicar las rutas que el medio de transporte elegido debe seguir en su ida y venida de la localización correspondiente.

Desde el punto de vista computacional, su resolución presenta una importante dificultad que imposibilita la utilización de los métodos multiobjetivo exactos para la obtención de la frontera eficiente. Para tratar de aproximarla utilizamos un método metaheurístico el cual puede generar un número de soluciones lo suficientemente grande como para que el decisor le resulte difícil la elección de una de ellas.

Esto es lo que ocurre en la aplicación del modelo para la localización de incineradoras de residuos MER en Andalucía, aplicación en la que se obtienen 2499 soluciones eficientes. Para facilitar el proceso de elección que debe llevar a cabo el decisor realizamos con él un proceso interactivo implementado en un entorno Windows el cual incluye algunos gráficos con el fin de facilitar la interacción y la comparación de soluciones.

El proceso de interacción realizado permite concluir que es una herramienta eficaz para la toma de decisiones puesto que la forma en que se realiza la interacción con el decisor es muy simple al tener tan sólo que elegir una solución entre un conjunto pequeño de ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBAREDA-SAMBOLA, M., DÍAZ, J. y FERNÁNDEZ, E. (2005): *A compact model and tight bounds for a combined Location/Routing problem*, Computers and Operations Research, nº 32, 3, pp. 407-428.
- ALVES, M.J. y CLIMACO, J. (2000): "An interactive method for 0-1 multiobjective problems using simulated annealing and tabu search", *Journal of Heuristics*, nº 6, 3, pp. 385-403.
- CABALLERO, R., GANDIBLEUX, X. y MOLINA, J. (2004): *MOAMP a generic multiobjective metaheuristic using an adaptative memory*, Technical Report, University of Valenciennes.
- CABALLERO, R., GONZÁLEZ, M., GUERRERO, F.M., MOLINA, J. y PARALERA, C. (2007): "Solving a multiobjective Location Routing problem with metaheuristic procedure. Application to the case of Andalusia", *European Journal of Operational Research*, nº 177, pp. 1751-1763.
- COELLO, C. (2000): "Handling preferences in evolutionary multiobjective optimization: A survey", Congress Evolutionary Computation Proc. Inst. Electr. Electronics Engineers, IEEE, Piscataway, NJ.
- ERKUT, E. y NEUMAN, S. (1989): *Analytical models for locating undesirable facilities*, EJOR, nº 40, pp. 275-291.
- ERKUT, E. y VERTER, V. (1995): *Hazardous materials logistics*, in: Z. Drezner (ed) FacilityLocation: a Survey of Applications and Methods (Heidelberg, Springer).
- ERKUT, E. y VERTER, V. (1998): "Modeling of transport risk for hazardous material", *Operations Research*, nº 46, 5, pp. 625-642.
- FERNÁNDEZ, E. y PUERTO, J. (2003): "Multiobjective solution of the uncapacitated plant location problem", *European Journal of Operational Research*, nº 145, pp. 509-529.

- GANDIBLEUX, X. y FREVILLE, A. (2000): "Tabu search based procedure for solving the 0-1 multiobjective knapsack problem: the two objectives case", *Journal of Heuristics*, nº 6, pp. 361-383.
- GIANNIKOS, I. (1998): "A multiobjective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes", *European Journal of Operational Research*, nº 104, pp. 333-342.
- GLOVER, F. y LAGUNA, M. (1997): *Tabu Search* (Boston, Kluwer Academic Publishers).
- HAPKE, M., JASZKIEWICZ, A. y SLOWINSKI, R. (1998): "Interactive analysis of multicriteria project scheduling problems", *European Journal of Operational Research* nº 107, pp. 315-324.
- MARSH, M. y SCHILLING, D.A. (1994): "Equity measurement in facility Location analysis: A review and framework", *European Journal of Operational Research*, nº 74, pp. 1-17.
- MIETTINEN, K. (2002): *Interactive nonlinear multiobjective procedures*, in: M. Ehrgott and X. Gandibleux (eds.) *Multiple Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Survey*. (International Series in Operations Research & Management Science, vol. 52), (Boston, Kluwer Academic Publishers).
- MIN, H., JAYARAMAN, V. y SRIVASTAVA, R. (1998): "Combined Location Routing problems: A synthesis and future research directions", *European Journal of Operational Research*, nº 108, pp. 1-15.
- SANTOS, D.R., SUÁREZ-VEGA, R. y DORTA, P. (2001): "Un modelo de decisión multicriterio para localización de centros de tratamientos de residuos", *Estudios de Economía Aplicada*, nº 17, pp. 163-182.
- STEUER, R. E. (1986): *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application*, (New York, Wiley).
- ULUNGU, E.L., TEGHEM, J. y OST, C. (1998): "Efficiency of interactive multi-objective simulated annealing through a case study", *Journal of the Operational Research Society*, nº 49, pp. 1044-1050.