

FuzzyCovering: un Sistema de Ayuda a la Decisión para Problemas de Localización con Cobertura Difusa

Virgilio C. Guzmán, David A. Pelta, and José Luis Verdegay

Dpto. de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial,
Universidad de Granada, 18014, Granada, España.
vguzman@uagro.mx, {dpelta,verdegay}@decsai.ugr.es

Resumen En este trabajo se presenta un prototipo de sistema de ayuda a la decisión espacial, FuzzyCovering, diseñado para ayudar en la toma de decisiones relacionadas con problemas de localización de instalaciones. En FuzzyCovering se integran diversos componentes que facilitan el modelado, la solución y la visualización de resultados, específicamente de problemas de localización con cobertura. FuzzyCovering facilita el estudio de diversos escenarios de la distribución de instalaciones y proporciona un abanico de soluciones que permiten al usuario tomar las mejores decisiones. Para tratar la incertidumbre inherente a algunos elementos subyacentes de los problemas reales de localización, FuzzyCovering integra un enfoque difuso en el que las restricciones del problema pueden ser definidas de manera imprecisa. Se presenta una descripción detallada de la arquitectura y funcionalidad del sistema, y para demostrar las bondades de FuzzyCovering se muestra un caso de estudio de un problema de localización de máxima cobertura con restricciones difusas.

Keywords: sistema de ayuda a la decisión espacial, problema de localización con cobertura, problema de optimización con restricciones difusas

1. Introducción

Los sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) se han convertido en herramientas de gran utilidad en el proceso de toma de decisiones en el que intervienen datos espaciales. Un SADE es un sistema informático que integra tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD), cuyo propósito principal es ayudar al decisor en problemas que tienen dimensión espacial Walsh [9]. Moore [6] señala que un SADE incorpora fundamentalmente un conjunto de modelos analíticos, visualizadores gráficos y la capacidad de representación de informes tabulares. Un SADE por lo general está orientado a problemas de un dominio de aplicación específico. En un sentido general, mediante una interfaz gráfica, un SADE permite la interacción de sus modelos de optimización integrados con el decisor, y proporciona un conjunto de alternativas (soluciones) viables del problema bajo estudio. En este trabajo presentamos un prototipo de sistema de ayuda a la decisión espacial, el cual hemos llamado FuzzyCovering. FuzzyCovering está

dirigido específicamente a ayudar a los decisores a resolver problemas complejos de localización con cobertura. Mediante el uso de FuzzyCovering es posible estudiar diversos escenarios con el fin de encontrar las mejores estrategias de distribución de instalaciones.

Diferentes situaciones del mundo real pueden ser modeladas a través de un problema de localización con cobertura (PLC). Por ejemplo, algunos modelos han sido propuestos para determinar las mejores localizaciones para estaciones de policías [4], localización de ambulancias [1], estaciones de bomberos [10], localizaciones de instalaciones de servicios médico para emergencias a gran escala generadas por desastres naturales o hechos por el hombre [5]. En un contexto general, todos estos modelos están enfocados a encontrar las mejores localizaciones para un número determinado de instalaciones, teniendo en cuenta que la distancia o tiempo de viaje entre los puntos de demanda que requieren los servicios y las instalaciones que ofrecen tales servicios no sea mayor que un umbral establecido.

El problema de localización con cobertura de conjuntos (PLCC), introducido por Toregas [7], y el problema de localización de máxima cobertura (PLMC) planteado por Church [3], son los modelos más comúnmente utilizados. El PLCC trata de encontrar un número mínimo de instalaciones que cubran todos los nodos de demanda (cobertura total), mientras que el PLMC trata de maximizar la demanda cubierta con un número fijo de instalaciones conocido a priori, sin que sea necesario cubrir todos los nodos (cobertura parcial).

FuzzyCovering permite el modelado de un PLC cuyos parámetros se conocen con precisión (problema crisp). Sin embargo, debido a la relevancia de la gestión de la incertidumbre en algunos elementos de estos tipos de problemas, una de las características principales de FuzzyCovering es permitir el modelado y la solución de PLC's con incertidumbre. Específicamente, considerando la importancia notable del PLMC en aplicaciones del mundo real [2], y el hecho de que FuzzyCovering se encuentra en su fase de desarrollo, este prototipo incluye únicamente la implementación de este problema, tanto en su versión crisp como difuso. El PLMC implementado es un modelo en el que se considera la distancia o tiempo de servicio como un valor incierto. Esta distancia es modelada mediante restricciones difusas. El problema difuso resultante es convertido a un conjunto de problemas crisp que pueden ser resueltos mediante técnicas de optimización tradicionales. En este sentido, FuzzyCovering proporciona métodos metaheurísticos para resolver estos modelos. Todos estos métodos pueden ser utilizados para resolver tanto los modelos crisp como los difusos.

FuzzyCovering proporciona un mecanismo visual y de fácil uso para el usuario. Mediante una interfaz gráfica permite la configuración de escenarios y la visualización de soluciones para un problema de localización específico. Por otro lado, debido a la forma modular en que fue desarrollado FuzzyCovering, se facilita la inclusión de nuevos modelos de localización con cobertura, así como la integración de otros métodos de solución.

La descripción de la aplicación se organiza de la siguiente forma. En la sección 2 se describe con mayor detalle la arquitectura y funcionalidad.

dad de FuzzyCovering. En la sección 3 se presenta un caso de estudio del problema de localización de máxima cobertura con restricciones difusas. Finalmente nuestras conclusiones y posibles trabajos futuros son expuestos en la Sección 4.

2. Arquitectura y descripción de FuzzyCovering

En esta sección se describe con mayor detalle la arquitectura y funcionalidad de FuzzyCovering. Como se mencionó previamente, FuzzyCovering es un SADE orientado a ayudar en la toma de decisiones relacionadas a los problemas de localización con cobertura. Como todo SADE, FuzzyCovering permite al decisor la configuración y visualización de las soluciones encontradas para un problema determinado. La Figura 1 muestra la arquitectura de FuzzyCovering. El módulo de interfaz gráfica proporciona al decisor el medio para la configuración de escenarios y la visualización de las diferentes soluciones obtenidas. El sistema de gestión de módulos de optimización es el encargado de gestionar los modelos de localización integrados en FuzzyCovering y de ejecutar el método de resolución elegido por el decisor. El sistema de gestión de datos espaciales proporciona los elementos necesarios para mostrar geográficamente las soluciones.

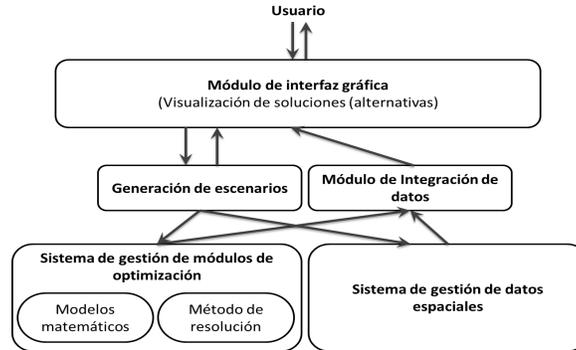


Figura 1: Arquitectura de FuzzyCovering.

En general, el procedimiento para modelar un escenario de un problema de localización en FuzzyCovering, consiste de cuatro pasos: (i) configurar el problema, (ii) seleccionar el modelo adecuado para representar apropiadamente las distintas variables del problema a resolver, (iii) seleccionar y configurar el método de resolución para solucionar el modelo previamente configurado, y (iv) elegir un visualizador gráfico para observar e interactuar con las soluciones encontradas. La Figura 2 muestra un esquema general de este procedimiento.

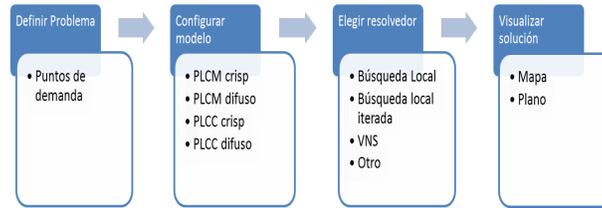


Figura 2: Flujo de trabajo para resolver un problema de localización en FuzzyCovering.

Como se mencionó en la introducción, FuzzyCovering proporciona una interfaz gráfica que permite al decisor realizar todos estos pasos de manera fácil e intuitiva. Esta funcionalidad está incluida en las ventanas asociadas a la definición del problema, configuración del modelo y metaheurística, y al visualizador de soluciones. A continuación se describe cada uno de estos pasos a seguir para configurar un escenario.

Definición del problema

El primer paso para configurar el escenario consiste en obtener el conjunto de puntos de demanda a considerar en el problema. FuzzyCovering permite leer los puntos de demanda a partir de un archivo CSV. Cada punto de demanda debe estar conformado por tres atributos: un identificador, una ubicación (x, y) , y un valor de la demanda. El identificador determina de forma única al punto de demanda. La ubicación (x, y) puede ser una localización geográfica si estamos trabajando con mapas o una coordenada en el plano Euclídeo si estamos analizando escenarios no geográficos. El valor de la demanda representa la importancia del punto de demanda.

Para construir el escenario sólo se debe seleccionar el archivo CSV que contiene los datos y posteriormente elegir la opción guardar. Al elegir esta opción, FuzzyCovering crea un conjunto de objetos que representan los puntos de demanda. Estos objetos son almacenados de forma persistente en un archivo con formato XML, el cual puede ser utilizado en otras instancias de FuzzyCovering.

La Figura 3 muestra la ventana asociada para obtener los puntos de demanda del problema desde un archivo de texto CSV. En esta ventana, debemos activar la opción *Puntos de demanda geográficos* si los puntos de demanda son coordenadas geográficas. Con esta acción, FuzzyCovering tratará el valor de x como la latitud, y el valor de y como la longitud.

Configuración del modelo

Para generar un modelo es necesario haber configurado previamente un problema sobre el cual se aplicará el modelo. La Figura 4 muestra la ventana utilizada para la configuración de un PLMC con restricciones



Figura 3: Ventana que permite obtener los puntos de demanda contenidos en un archivo de texto CSV.

difusas. Esta ventana está conformada de dos partes. En la parte superior se encuentran los campos asociados a los parámetros elementales del modelo, es decir, aquellos parámetros necesarios tanto para el modelo crisp como para el difuso. Mediante estos campos se selecciona el problema a resolver; la distancia aceptada entre las instalaciones y los puntos de demanda; la medida de distancia, la cual puede ser Geográfica, si estamos trabajando con localizaciones geográficas o Euclídea si estamos trabajando con otros valores de distancia; y el número de instalaciones que queremos localizar. En la parte inferior se presentan los campos requeridos para configurar la restricción difusa del PLMC. Los parámetros a ingresar son: el porcentaje de tolerancia permitido para violar la restricción difusa, el número de ejecuciones y valores correspondientes para cada $\alpha \in [0.0, 0.1, \dots, 1.0]$.

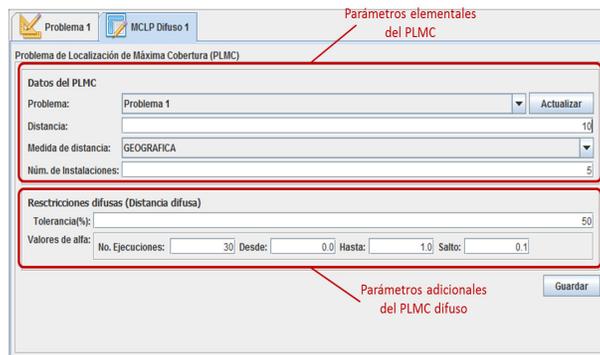


Figura 4: Ventana que permite la configuración de un PLMC difuso.



Figura 5: Ventana para configurar y ejecutar una metaheurística.

Configuración del método de resolución

FuzzyCovering cuenta por ahora con métodos metaheurísticos orientados a resolver los modelos de localización incorporados. Específicamente, hay dos metaheurísticas implementadas en FuzzyCovering, una búsqueda local y una búsqueda local iterada. En general, ambas metaheurísticas reciben como parámetros de entrada el modelo a resolver, el número de iteraciones a ejecutar; y para el caso particular de la búsqueda local iterada, además de estos valores se requieren los parámetros de la perturbación que utiliza esta búsqueda para escapar de óptimos locales. La Figura 5 muestra la ventana correspondiente a la configuración y ejecución de una metaheurística. La configuración mostrada en la ventana corresponde a una búsqueda local iterada. Una vez establecida la configuración de la metaheurística, se ejecuta mediante la opción *Ejecutar*. Esta acción genera una solución para cada valor de α .

Visualización de las soluciones

La ejecución de una metaheurística en FuzzyCovering genera de forma automática la visualización de las soluciones. La Figura 6 muestra el conjunto de soluciones encontradas para un escenario del PLMC difuso. Para cada solución se muestra la distancia utilizada, el valor de la cobertura, y el porcentaje de cobertura obtenido. Además, cada una de estas soluciones puede ser visualizada de forma gráfica, en mapas si los puntos de demanda están distribuidos geográficamente o en el plano Euclídeo en caso contrario. La Figura 7 muestra una solución en un mapa obtenida por FuzzyCovering.

3. Caso de estudio: PLMC con restricciones difusas

Con la finalidad de mostrar las bondades que ofrece FuzzyCovering para tratar un problema de localización con cobertura, en esta Sección se describe un caso de estudio. En este caso de estudio, se modela un PLMC con restricciones difusas usando datos aleatorios. FuzzyCovering aplica

	Distancia		% de Cobertura	
1	5,00	2.905,00	56,23%	Ver
2	5,15	3.108,00	60,16%	Plano
3	5,30	3.002,00	58,11%	Mapa

Figura 6: Ventana que muestra las distintas soluciones encontradas para un escenario específico de un problema de localización con cobertura.

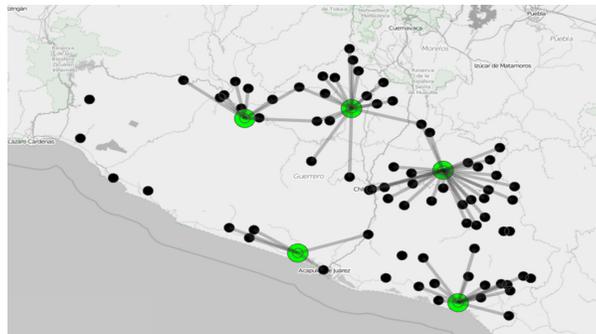


Figura 7: Tipo de solución gráfica que proporciona FuzzyCovering.

el enfoque paramétrico propuesto por Verdegay [8] para resolver el problema. Este enfoque emplea dos fases. En la primera fase, se transforma el problema difuso en un conjunto de problemas crisp, usando α – cortes, donde el parámetro $\alpha \in [0, 1]$ representa el grado de satisfacción del decisor. Como consecuencia, para cada α considerado, se obtiene un PLMC clásico (α –PLMC). En la segunda fase, todos estos problemas resultantes se resuelven con técnicas convencionales de optimización. Los resultados obtenidos para los diferentes valores de α generan un conjunto de soluciones, las cuales son integradas mediante el Teorema de Representación de conjuntos difusos. En nuestro caso, para resolver cada uno de estos problemas crisp, utilizamos la búsqueda local iterada proporcionada también por FuzzyCovering.

En este escenario asumimos una área de dimensión de 30 x 30 unidades, en la cual se localizan 200 puntos de demanda, siguiendo una distribución uniforme en el intervalo [0, 30]. La demanda asignada a cada punto es un valor que sigue también una distribución uniforme en [1, 50]. El número de instalaciones a localizar es 5 y la distancia estándar establecida es de 6 unidades. Todos estos puntos de demanda se encuentran almacenados en un archivo de texto CSV y son obtenidos por FuzzyCovering mediante

α	Cobertura (en porcentaje)			
	Máximo	Mínimo	Media	Desv. Est.
0.0	68.78	59.78	65.17	2.20
0.1	72.38	66.26	70.05	1.71
0.2	78.63	71.04	74.59	1.85
...
0.9	99.01	90.65	95.97	2.26
1.0	99.15	91.13	96.02	2.21

Tabla 1: Porcentaje máximo, mínimo, media y desviación estándar de cobertura obtenida (sobre 30 ejecuciones).

la ventana descrita anteriormente (ver Figura 3). Consideramos también que todos los puntos de demanda son localizaciones potenciales para establecer las instalaciones y asumimos que el costo de instalación es el mismo para todas las instalaciones, por lo que no se considera en el modelo. Además, todas las instalaciones a localizar son homogéneas, es decir, se asume que tienen la misma capacidad de servicio. La distancia Euclídea se utiliza para calcular la distancia entre las instalaciones y los puntos de demanda.

En el sentido difuso, nosotros consideramos que el nivel de tolerancia en la restricción de distancia es hasta del 50% más sobre el valor de esta distancia, es decir, el decisor acepta la violación de la distancia hasta un valor de 9 unidades, con respecto al valor de la distancia estándar establecida 6. Este escenario fue resuelto para cada valor de $\alpha \in [0.0, 0.1, \dots, 1.0]$. Se realizaron 30 ejecuciones independientes con 1000 evaluaciones de la función objetivo. Para cada valor de α , FuzzyCovering obtuvo la cobertura máxima, mínima, media y la desviación estándar, (ver Tabla 1). FuzzyCovering proporciona un archivo CSV que contiene todos estos resultados.

Como se mencionó anteriormente, FuzzyCovering permite ver las soluciones encontradas en forma gráfica. La Figura 8 muestra dos de las mejores soluciones encontradas para el escenario previamente mencionado. En la Figura 8a se muestra la mejor solución para $\alpha = 0.0$ y en la Figura 8b se muestra la mejor solución para $\alpha = 1.0$.

4. Conclusiones y trabajos futuros

El prototipo (FuzzyCovering) de un sistema de ayuda a la decisión espacial presentado en este trabajo está diseñado para ayudar en la toma de decisiones relacionadas a los problemas de localización de instalaciones. Específicamente, FuzzyCovering está dirigido hacia los problemas de localización con cobertura. Debido a la necesidad de tratar la incertidumbre asociada en algunos de los elementos de los problemas de localización, FuzzyCovering integra un modelo difuso en el que las restricciones del problema pueden ser definidas de manera imprecisa. Este modelo con restricciones difusas trata la distancia o tiempo de respuesta como valores imprecisos, lo cual, permite resolver problemas de localización más cercanos a la realidad.

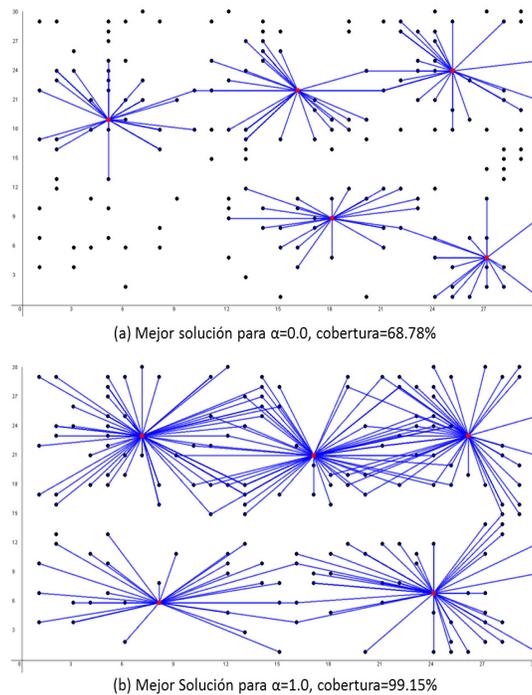


Figura 8: Mejores soluciones encontradas por FuzzyCovering para un PLMC difuso con 5 instalaciones.

Debido a la importancia de los problemas de localización de instalaciones, y a la complejidad inherente para determinar una distribución adecuada para las instalaciones de un problema real específico, FuzzyCovering facilita el análisis de diversos escenarios del problema de localización bajo estudio, y proporciona un abanico de soluciones que ayudan al decisor a tomar las mejores decisiones.

La arquitectura modular de FuzzyCovering permite extender su funcionalidad mediante la inclusión de nuevos modelos de localización y algoritmos de solución. En este sentido, como trabajos futuros se tiene previsto agregar a FuzzyCovering el PLCC, tanto en su versión crisp como difuso.

Asimismo, se prevé agregar extensiones del PLMC en las que se consideren otros elementos difusos del problema, tales como la demanda generada en los nodos, la capacidad de respuesta de las instalaciones, el costo de las instalaciones, entre otros. Por otro lado, aunque las metaheurísticas integradas en FuzzyCovering proporcionan soluciones factibles a los problemas de localización, se tiene proyectado incluir otros métodos de resolución para hacer de FuzzyCovering una herramienta atractiva y flexible para el decisor.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos TIN2014-55024-P (Ministerio de Economía y Competitividad) y P11-TIC-8001 (Junta de Andalucía, incluyendo fondos FEDER). El primer autor posee una beca otorgada por el PROMEP, México, establecida en el convenio PROMEP/103.5/12/6059.

Referencias

1. L. Brotcorne, G. Laporte, and F. Semet. Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, 147(3):451–463, 2003.
2. V. C. Guzman, J. L. Verdegay, and D. A. Pelta. Fuzzy models and resolution methods for covering location problems: an annotated bibliography. *IJUFKS*, 2015. En revisión.
3. R. Church and C. Reville. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Sci. Assoc.*, 32(1):101–118, 1974.
4. K. M. Curtin, K. Hayslett-McCall, and F. Qiu. Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models. *Networks and Spatial Economics*, 10(1):125–145, 2007.
5. H. Jia, F. Ordóñez, and M. Dessouky. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *IIE Transactions*, 39(1):41–55, 2007.
6. T. Moore, S. Openshaw, and R. Abraham. Geospatial expert systems. In *Geocomputation*, pages 127–159. Taylor & Francis London, 2000.
7. C. Toregas, R. Swain, C. Reville, and L. Bergman. The location of emergency service facilities. *Operations Research*, (6):1363–1373, 1971.
8. J. L. Verdegay. Fuzzy mathematical programming. In M. M. Gupta and E. Sanchez, editors, *Fuzzy information and decision processes*, pages 231–237. 1982.
9. M. R. Walsh. Toward spatial decision support systems in water resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(2):158–169, 1993.
10. L. Yang, B. F. Jones, and S.-H. Yang. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 181(2):903–915, 2007.