

DECISION SUPPORT SYSTEM SOFTWARE INTEGRATING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND SOFT COMPUTING TO SOLVE OPTIMAL LOCATION PROBLEMS OF RENEWABLE ENERGY PLANTS.

Jimenez Pérez, J. A.¹; Sanchez-Lozano, J. M.¹; García-Cascales, M. S.¹;
Lamata, M. T.²

¹ Universidad Politécnica de Cartagena, ² Universidad de Granada

The capacity to make correct decisions could be the difference between success and failure, especially in business and engineering contexts. This issue becomes even more critical in huge projects, where decision processes are very important. For that reason decision support tools such as Multicriteria Decision Analysis have been developed.

On the other hand, the powerful computing capacity of modern computers has allowed the widespread use of such powerful and flexible tools as Geographic Information Systems (GIS), for working with a database that represents a faithfully real world. Moreover, new views in computation have appeared, such as Soft Computing (SC), which uses fuzzy logic to mathematically contextualize the language.

Combining these tools, a Decision Support System (DSS) has been developed. It is a software application which is the product of different studies relating to the optimal location of renewable energies. It allows to solve problems of optimal locations for any kind of installations considering geographical and spatial variables.

Keywords: *Geographic Information Systems (GIS), Soft Computing (SC); Fuzzy sets; Renewable Energies (RE); Decision Support System (DSS).*

SOFTWARE INTEGRADO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SOFT COMPUTING EN PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN PARA ENERGÍAS RENOVABLES

Especialmente en el contexto empresarial y de la ingeniería, la capacidad para tomar decisiones correctas puede marcar la diferencia entre el éxito o el fracaso. Esta situación se vuelve más crítica en proyectos de gran envergadura, en los que la toma de decisiones es más determinante. Es por esto, que se desarrollaron herramientas de ayuda como el Análisis de Decisión Multicriterio.

Por otra parte, la capacidad de computación de los actuales ordenadores ha permitido generalizar el uso de herramientas tan potentes y flexibles como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten trabajar con una base de datos que represente la realidad fielmente. Así mismo, surgieron nuevos enfoques computacionales como el Soft Computing (SC), que hace uso de la lógica difusa para contextualizar matemáticamente el lenguaje.

Combinando estas herramientas, se ha desarrollado un Sistema de Ayuda a la Decisión, una aplicación software fruto de distintos estudios de localización óptima de energías renovables, y que permite resolver problemas de ubicación óptima de instalaciones de cualquier tipo teniendo en cuenta diferentes variables de carácter geográfico y espacial.

Palabras clave: *Sistemas de Información Geográfica; Soft Computing; Conjuntos difusos; Energías Renovables; Sistema de Ayuda a la Decisión*

Correspondencia: M^a del Socorro García-Cascales. Dpto. Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos, Universidad Politécnica de Cartagena. C/Dr Fleming s/n. C.P. 30201 Cartagena, Murcia, España. Teléfono +34 968 326574. FAX +34 924 32 65 00. E-mail: socorro.garcia@upct.es

1. Introducción y objetivos

El objetivo principal de este artículo es el desarrollo de un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) integrando en una sola herramienta toda la metodología propuesta por (Sánchez-Lozano et al, 2013) para resolver problemas de ubicación óptima de instalaciones de energías renovables.

En ella se proponía aplicar el Análisis de Decisión Multicriterio (en inglés, Multicriteria Decision Analysis o MCDA) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para encontrar emplazamientos óptimos de instalaciones de energías renovables en la costa de la Región de Murcia apoyándose en el software GIS de libre distribución gvSIG 1.10. Debido a que las conclusiones fueron favorables, se planteó la conveniencia de desarrollar un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) integrado que combinara dichas disciplinas. Es decir, la creación de un software que se sirviera de los modelos matemáticos que se emplean en la decisión y de la tecnología SIG como base de datos.

Con estas premisas nace Ubicaciones Óptimas v1.0, nombre con el que se bautizó el SAD presentado en este artículo y que ha sido desarrollado como una aplicación software de escritorio para Sistemas Operativos Microsoft Windows. En los siguientes apartados se incluyen los fundamentos del funcionamiento básico del sistema, así como la exposición de la resolución de un problema de ubicación óptima.

2. Ubicaciones Óptimas v1.0

Como todos los Sistemas de Ayuda a la Decisión, Ubicaciones Óptimas v1.0 está formado por al menos 3 subsistemas (Turban et al, 2006):

- Subsistema de Manejo de Datos: Contiene la información sobre el problema. En este caso, los Sistemas de Información Geográfica actuarán como base de datos.
- Subsistema de Manejo de Modelos: Son los modelos matemáticos empleados en resolver el problema. Ubicaciones Óptimas v1.0 emplea los modelos AHP y TOPSIS difusos.
- Subsistema Interfaz de Usuario: Es el entorno con el que el usuario controla el SAD. Dicha interfaz ha sido diseñada totalmente durante el desarrollo de Ubicaciones Óptimas v1.0.

Figura 1: Subsistemas básicos del Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD)



2.1. Entrada de datos al SAD

Como ya se ha comentado, uno de los elementos a integrar en el SAD objeto de este artículo son los SIG, que permitirán crear una base de datos con la que ejecutar el SAD. Es decir, Ubicaciones Óptimas v1.0 emplea la tecnología SIG para obtener la totalidad de la información necesaria para afrontar el problema de toma de decisión.

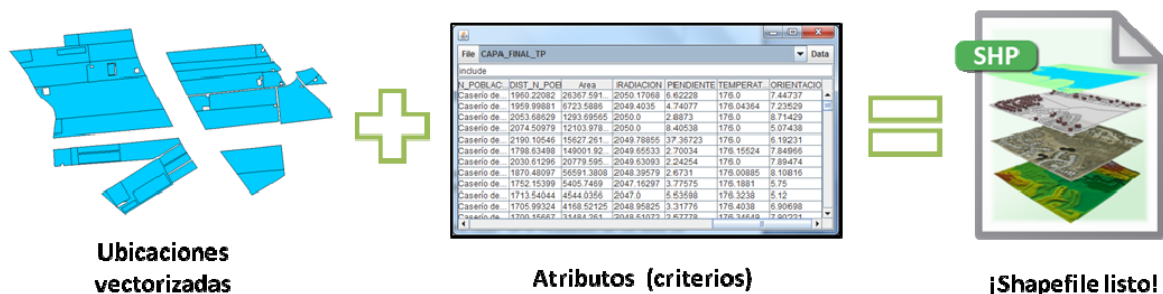
La aplicación parte de un fichero en formato ESRI Shapefile (.Shp) (Zeiler, 2010) para realizar todas sus funciones. Este fichero debe haber sido editado y analizado previamente en un software SIG profesional, pues Ubicaciones Óptimas v1.0 no cuenta con la potencia y capacidades suficientes para elaborar información georreferenciada que permita crear nuevas capas, calcular distancias, determinar áreas, etc. Estas tareas deben realizarse mediante aplicaciones informáticas tales como ArcGIS, gvSIG, Grass, etc. En este caso particular, se ha recurrido a la herramienta gvSIG (www.gvsig.org) por tratarse de un software libre.

Aunque esto pueda parecer una debilidad del programa, en realidad puede entenderse como una fortaleza, ya que es lo que le permite ser flexible con el tipo de problema a plantear. El usuario puede crear un mapa digital de cualquier territorio y construir las capas temáticas que influyen en su problema específico de toma de decisión.

La idea de **partir desde un Shapefile preparado** se puede simplificar en los siguientes pasos:

1. El usuario vectoriza la geografía de un espacio, es decir, aquella que albergue la totalidad de alternativas que influyan en el problema de toma de decisión de una ubicación. De aquí se obtendrá una capa con la representación de las ubicaciones que son objeto de decisión (por ejemplo, las parcelas de un municipio).
2. Posteriormente, en la base de datos de la capa editada se deben evaluar, como mínimo, tantos atributos como criterios intervengan en el problema. Los atributos cuantificables representarán a los criterios en el problema de toma de decisión. Por ejemplo, pueden crearse atributos que contemplen las distancias de un punto concreto respecto a carreteras o núcleos de población, zonas de normativa medioambiental, parámetros meteorológicos... En definitiva, variables que afecten al cálculo de la toma de decisión.
3. Con ello, se ha obtenido un Shapefile listo para utilizar en Ubicaciones Óptimas v1.0.

Figura 2: Composición de un Shapefile para usar en Ubicaciones Óptimas v1.0

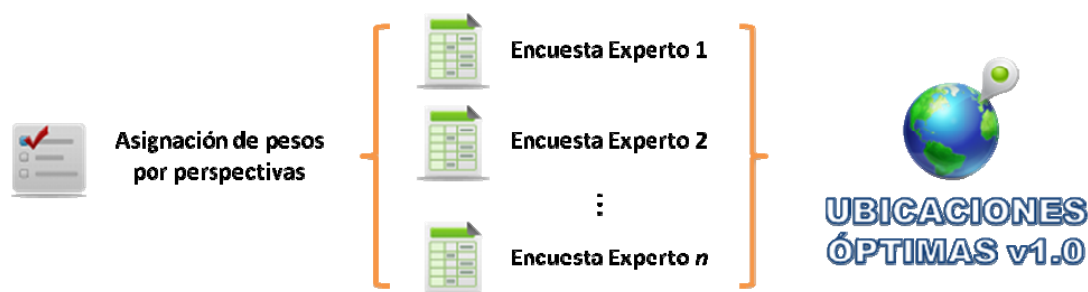


Por otro lado, para los cálculos de optimización es necesario establecer **la importancia relativa que tendrá cada criterio de decisión**. Ubicaciones Óptimas v1.0 permite establecer dicha importancia de 3 formas distintas:

- Todos los criterios presentan el mismo peso
- Los pesos de los criterios son asignados de forma manual
- Configurando perspectivas en función de la opinión de un grupo de expertos

Las 2 primeras opciones resultan obvias. La tercera de ellas responde a la metodología empleada para llevar a cabo el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 1980). Se trata de establecer las comparaciones por pares que requiere este método realizando encuestas a diferentes expertos en el campo sobre el que verse el problema de toma de decisión. Es una técnica pseudo-Delphi, en la que diferentes miembros independientes entre sí y sin interacción mutua realizan los juicios de valor para la comparación por pares. De esta manera se busca obtener un vector de pesos de los criterios según cada experto, para después obtener un único vector de importancia realizando una media aritmética entre todos ellos.

Figura 3: Entrada de datos para realizar la asignación de pesos por perspectivas de expertos



No en vano el cálculo de la asignación de pesos se realiza utilizando el método AHP, por lo que el usuario deberá introducir al programa la configuración de la jerarquía AHP de su problema. Esto se explica con más detenimiento en el siguiente apartado.

2.2. Modelos matemáticos implementados

Ubicaciones Óptimas v1.0 se basa en el cálculo del método TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) (Hwang and Yoon, 1981) y del TOPSIS basado en variables lingüísticas (E. Cables et al, 2012) para resolver los problemas de toma de decisión. A su vez, cuando se requiere calcular los coeficientes de importancia o pesos de los criterios, se recurre al empleo del método AHP. Además, estos cálculos pueden realizarse utilizando lógica clásica (crisp) o lógica difusa (Zadeh, 1965). Para este último caso, Ubicaciones Óptimas v1.0 está capacitado para introducir números triangulares difusos.

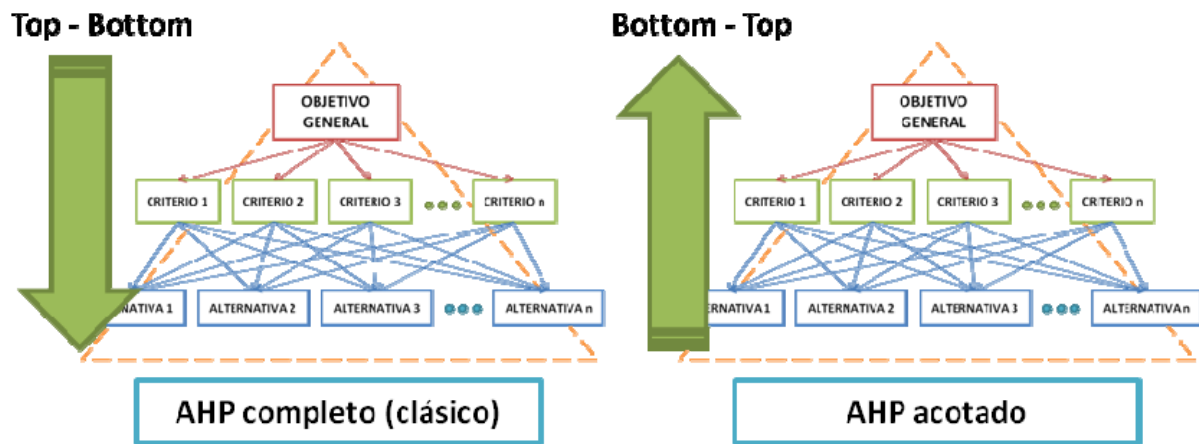
El tipo de lógica configurada afectará al resultado final del problema, que será más cercano a la realidad en el caso de la lógica difusa o fuzzy. El usuario del programa no debe preocuparse de ello en el momento de la asignación de juicios de valor, pues esta se realiza mediante etiquetas lingüísticas.

• Método AHP

El programa calcula el método AHP para obtener el vector de pesos de los criterios. El cálculo solo se requerirá cuando este vector no sea formado manualmente o mediante asignación directa de pesos: casos en el que todos los pesos son iguales o se introduzcan por teclado uno a uno.

El SAD soporta 2 formas distintas de calcular el AHP, lo que se ha llamado *AHP completo* y *AHP acotado*.

Figura 4: Asignación de pesos en los métodos AHP completo y AHP acotado



Anteriormente se ha indicado que la idea es seguir el camino de estudio en la que se pregunta a distintos expertos, mediante encuestas, por los juicios de valor para resolver los problemas de toma de decisión de la forma más acertada posible. Las preguntas que se realizan en dichas encuestas corresponden a los juicios clásicos del AHP. Se trata de ejecutar el procedimiento del AHP de forma clásica (Top - Bottom). Esto es lo que se ha denominado **método AHP completo** (Saaty, 1980).

Por otra parte, el **método AHP acotado** (García-Cascales et al, 2012) que establece los juicios de valor siguiendo un orden Bottom – Top en la jerarquía AHP. De esta forma se obtienen 2 ventajas: La primera es que simplifica al máximo el número de preguntas realizadas al decisor mediante las encuestas; Y en segundo lugar y a consecuencia de la primera, se minimizan las inconsistencias en los cálculos debido a contradicciones en la asignación de los juicios por parte del decisor.

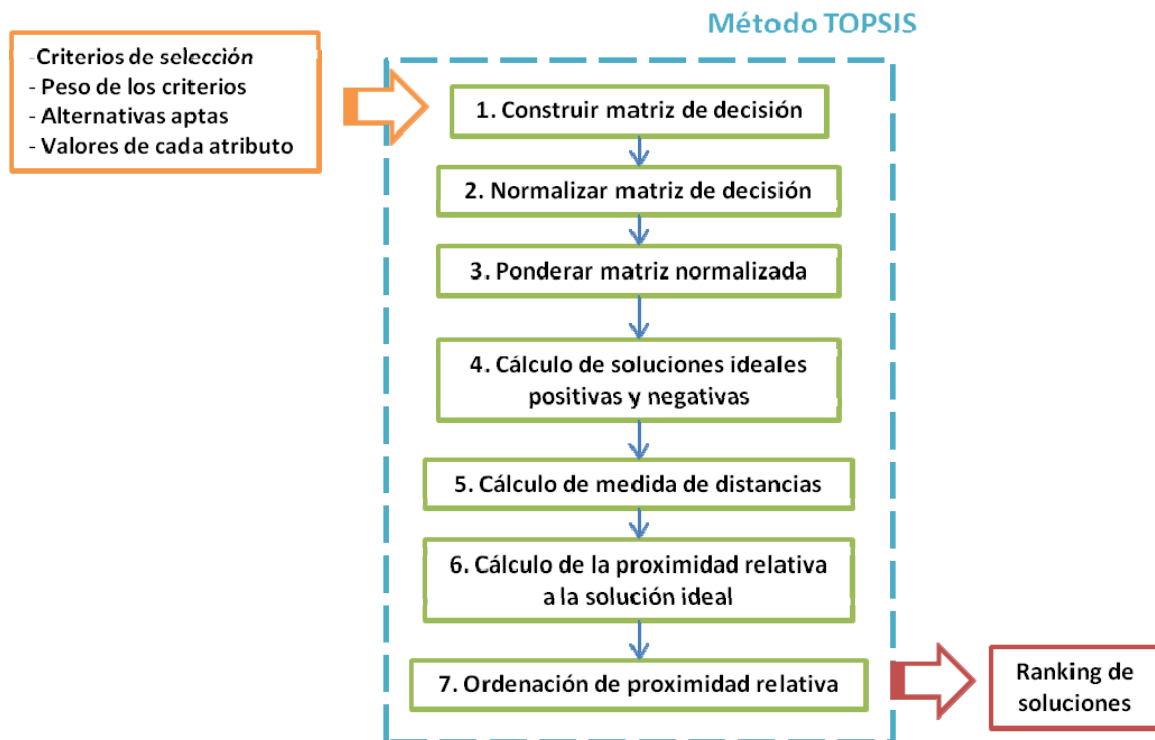
Sea cual sea la metodología utilizada, Ubicaciones Óptimas v1.0 obtendrá tantos vectores de pesos como perspectivas configuradas. Se hallará entonces un vector de pesos compromiso entre todos los expertos. Este no es más que la media aritmética de los vectores de los expertos.

• Método TOPSIS

Una vez que el programa conoce todos los datos de información y configuración del problema, construye una matriz de decisión y procede a ejecutar los pasos del método TOPSIS (Hwang y Yoon, 1981).

Tanto si la lógica de cálculo es crisp como fuzzy, el resultado final será un vector de valores $\overline{R}_i$, que constituye el ranking de alternativas o ubicaciones aptas de mayor a menor idoneidad. Siempre según la configuración del problema, que nunca hay que olvidar que es un proceso subjetivo.

Figura 5: Pasos de ejecución del método TOPSIS



2.3. Salida de resultados

Para mostrar los resultados de sus cálculos, Ubicaciones Óptimas v1.0 se apoya en 2 formas de representación distintas: mediante informes (en formato .Pdf y .Xls) y mediante un visor de mapas.

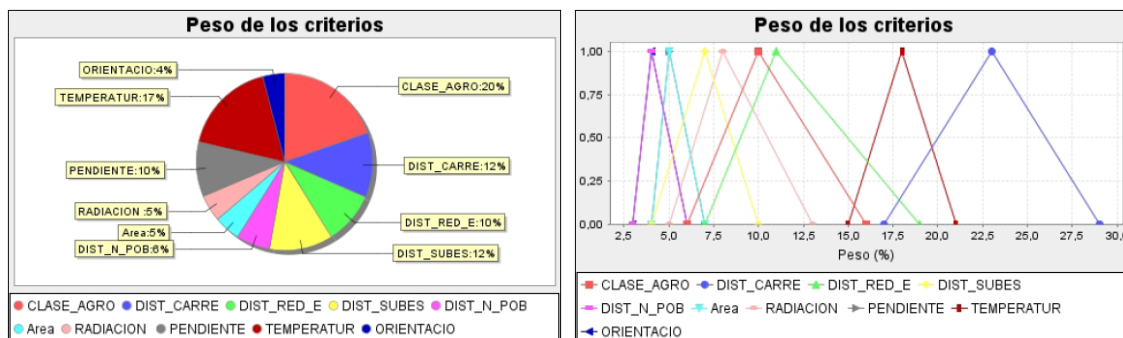
- **Informes PDF**

Durante el desarrollo de la aplicación se tuvo en cuenta que el usuario debía tener acceso a los resultados obtenidos con la implementación de resultados intermedios proporcionados por los métodos AHP y TOPSIS. De esta manera, se buscaba que el usuario no sólo pudiera analizar y comparar resultados intermedios, sino que además tuviera la posibilidad de corregir inconsistencias en los cálculos.

Ubicaciones Óptimas v1.0 presenta los resultados en PDF porque es un formato muy extendido, totalmente estandarizado y libre de licencias. No en vano ofrece la posibilidad del transporte de información en ficheros de pequeño tamaño.

Es destacable que la presentación de resultados es distinta según las opciones que el usuario haya configurado para resolver su problema. Por ejemplo, los gráficos que proporcionan los pesos de los criterios se presentan con barras para la lógica crisp, mientras que para la lógica fuzzy se emplean series que dan forma a números difusos triangulares.

Figura 6: Gráficos de los informes PDF para el caso de lógica crisp (izq.) y difusa (der.)



• Informes XLS

Además de los resultados de pesos, gráficos más representativos, proximidad relativa... puede darse el caso de que el usuario necesite acceder y exportar los cálculos intermedios que se realizan en cada paso de los métodos implementados. Esto puede ser interesante para comprobar la veracidad de los resultados, realizar análisis mucho más exhaustivos u obtener índices y gráficos que Ubicaciones Óptimas v1.0 no realice a priori.

Para ello la aplicación ofrece la posibilidad de generar ficheros en formatos de hoja de cálculo, en concreto con la extensión .Xls, utilizada de forma nativa por *Microsoft Excel* hasta su versión 2003. Es el formato más extendido para crear hojas de cálculo y actualmente casi todos los programas destinados a trabajar con este tipo de información permiten leer esta extensión. En la actualidad, se dispone de software de distribución gratuito capaz de leer y editar estos ficheros, como *Apache OpenOffice*, por lo que este formato cumple con la idea inicial de este proyecto de desarrollar un software libre.

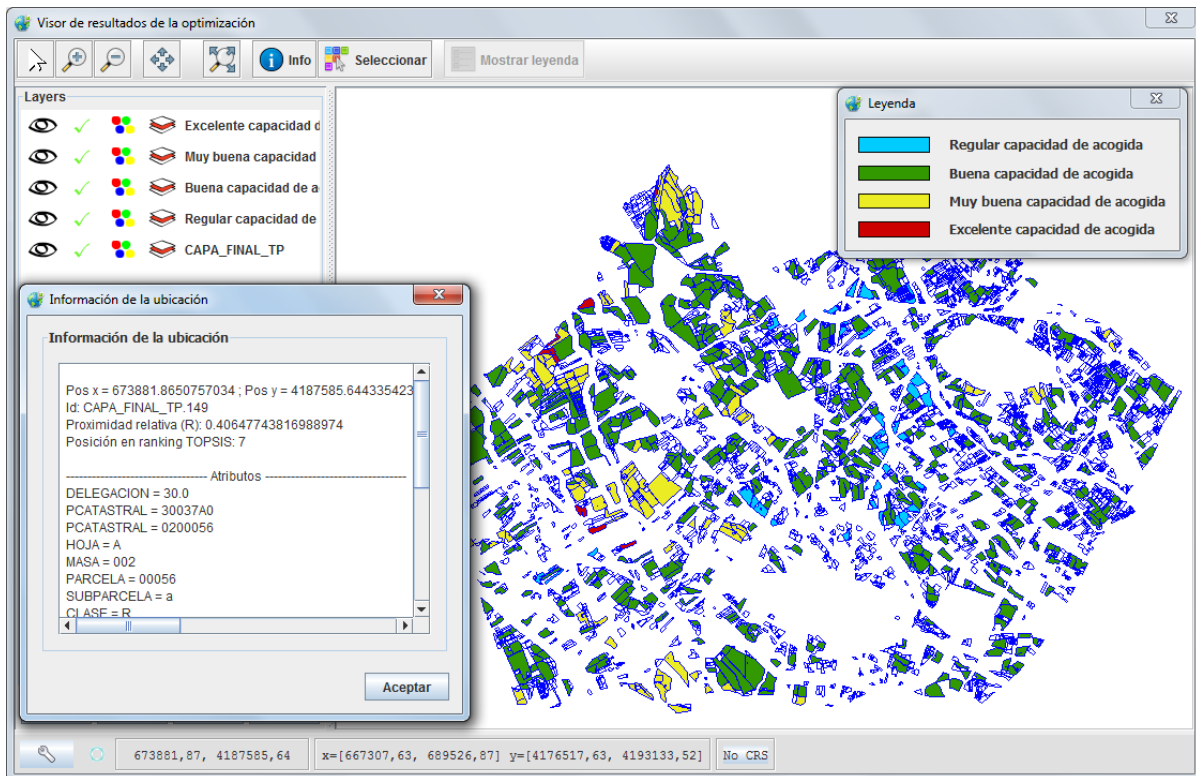
Por tanto, el SAD permite exportar ficheros .Xls con los cálculos intermedios fruto de la aplicación de los métodos AHP y TOPSIS.

• Visor de mapas

El visor de mapas se utiliza para mostrar al usuario de forma gráfica los resultados del ranking de alternativas, después de haber sido obtenido por el método TOPSIS. Esta es posiblemente la funcionalidad más importante de Ubicaciones Óptimas v1.0, ya que concluye la resolución del problema de toma de decisión aprovechando la potente herramienta de representación de mapas que tienen todos los Sistemas de Información Geográfica. Se trata por tanto de la culminación de la combinación de Sistemas de Ayuda a la Decisión (SAD) + Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En la representación de la solución, el sistema colorea las ubicaciones o parcelas de acuerdo a un código de colores. Las ubicaciones sin color (cuando todas las capas están visibles) corresponden a ubicaciones no aptas, que han sido filtradas antes de realizar todos los cálculos.

Figura 7: Representación de la solución del problema con el visor de mapas



Igualmente, resulta útil que el usuario pueda conocer toda la información referente a una ubicación del mapa. Para ello el visor dispone del botón *info*, con el que se habilita un puntero de selección que mostrará todos los datos de una ubicación determinada, referentes a los atributos del Shapefile dato y a los resultados relacionados con el método TOPSIS.

3. Resolución de un problema con Ubicaciones Óptimas v1.0

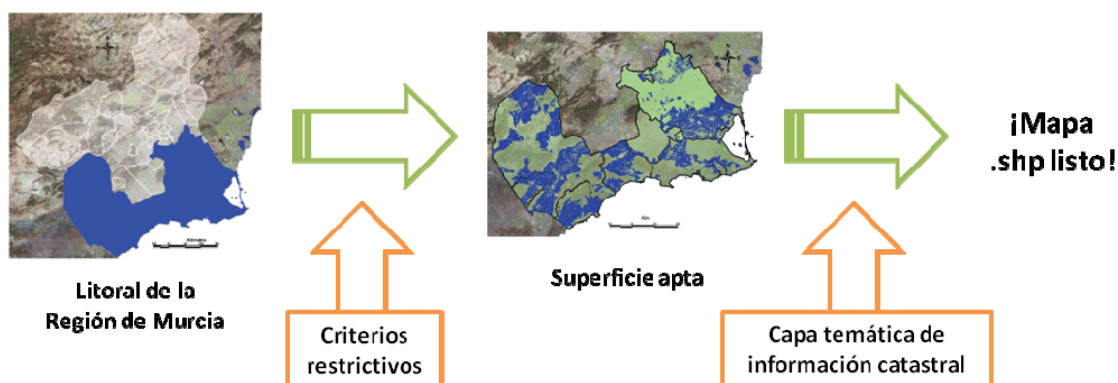
3.1. Datos del problema

A modo de prueba de la potencia del programa, se expone a continuación la resolución de un problema con el mismo.

Se propone la resolución de uno de los problemas estudiados por (Sánchez-Lozano, 2013) en su Tesis Doctoral. Este consiste en la búsqueda de ubicaciones óptimas para implantar instalaciones de plantas solares fotovoltaicas en el litoral de la Región de Murcia. Para ello, se evaluarán los factores que influyen en la capacidad de acogida de instalaciones de este tipo en dicha zona geográfica.

El punto de partida será por tanto, un mapa en formato ESRI Shapefile, compuesto a partir de diferentes capas temáticas obtenidas a través de organismos públicos oficiales. En dicho mapa se muestran las parcelas catastrales en las que sería posible física y legalmente (una vez impuesta la totalidad de restricciones) ubicar instalaciones de energías renovables.

Figura 8: Composición del mapa con las parcelas catastrales aptas para instalar fotovoltaica



Para la obtención de la superficie apta del mapa se han utilizado los criterios restrictivos indicados en la Tabla 1 (Sánchez-Lozano et al, 2013).

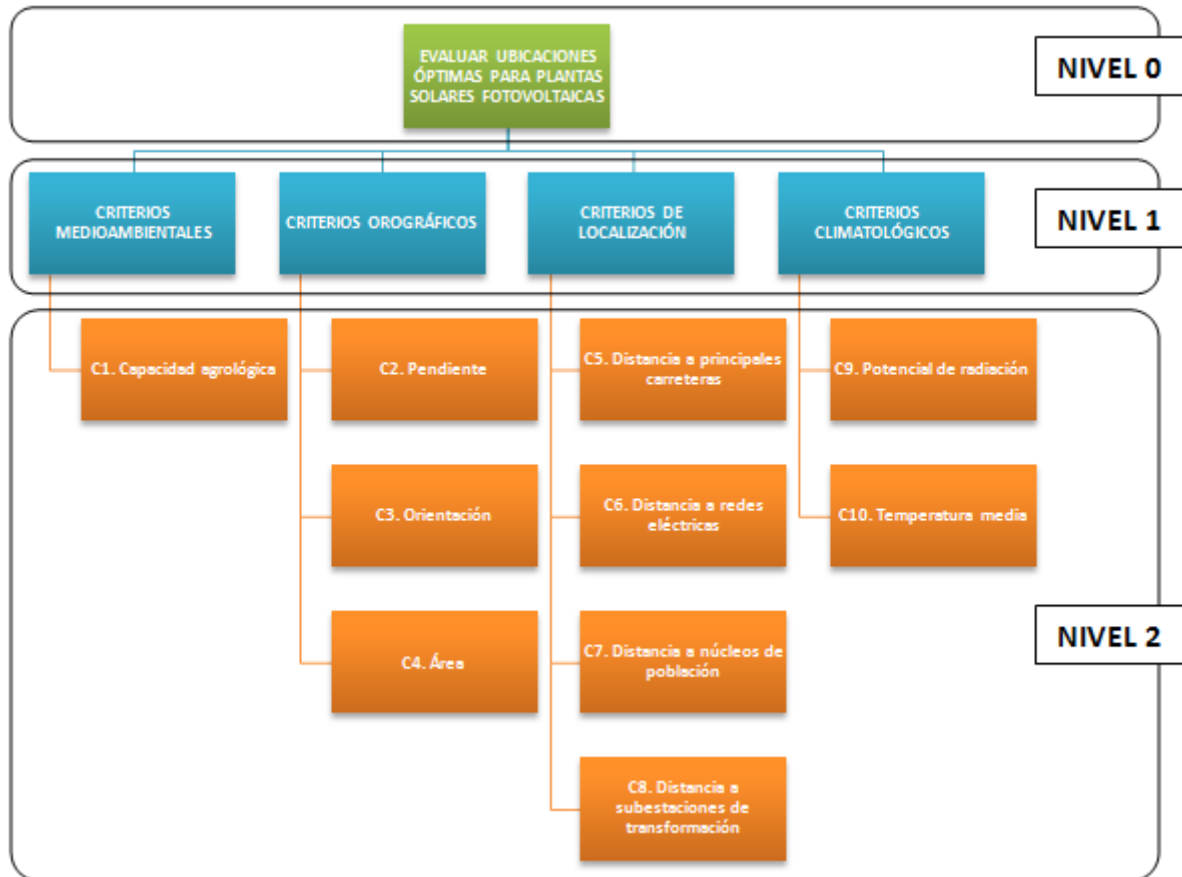
Tabla 1: Criterios restrictivos empleados en la realización del mapa

Categoría	Criterios
Tipología del suelo	- Suelo Urbano - Áreas de Alto Valor Paisajístico - Suelo No Urbano de Protección Especial
Comunicaciones	- Red viaria - Red ferroviaria
Infraestructuras	- Equipamientos - Sistemas Generales Hidráulicos
Orografía	- Montes
Hidrología	- Cauces y Ramblas
Patrimonio	- Arqueológico - Paleontológico - Cultural
Áreas protegidas	- LIC - ZEPA - Protección Costera - Vías Pecuarias

El Shapefile se ha construido con el software de libre distribución gvSIG 1.10. Dicho fichero contiene la base de datos o tabla de atributos construida a partir de las capas temáticas de los criterios de selección.

Igualmente, agrupando los criterios por categorías, se construye la jerarquía AHP del problema de decisión, que queda definida como muestra la Figura 9.

Figura 9: Jerarquía AHP del problema de ubicación de plantas solares fotovoltaicas



Además, para establecer el peso de los criterios y resolver el problema, se elaboró una encuesta que fue entregada a 3 expertos en la materia independientes entre sí, los cuales proporcionaron los juicios de valor que se muestran en la Tabla 2.

Finalmente, el problema se formula teniendo en cuenta que:

- Se buscan las mejores ubicaciones para instalaciones de plantas solares fotovoltaicas
- Se resolverá por el método AHP acotado
- Se utilizará lógica difusa

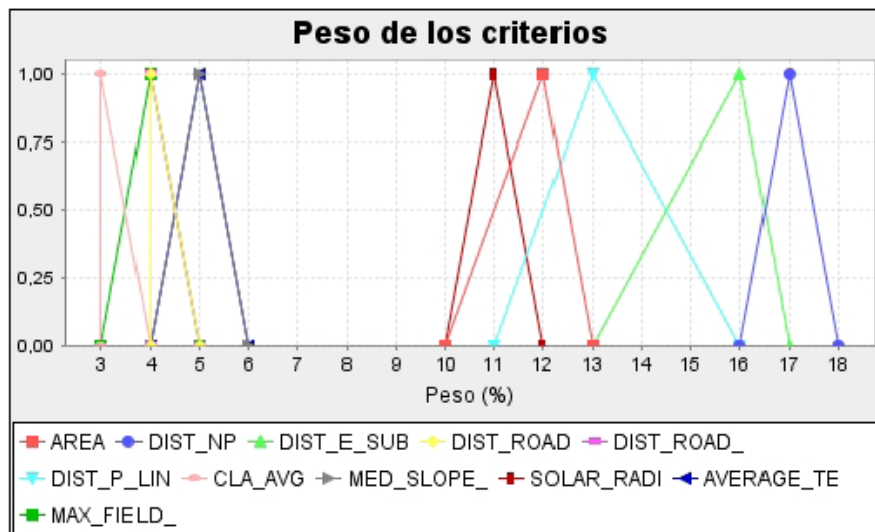
Tabla 2: Valoraciones de los expertos

EXPERTO 1		EXPERTO 2		EXPERTO 3	
Orden de importancia de los criterios					
C8		C7		C9	
C6		C2		C6	
C4		C3		C4	
C10		C5		C2	
C2		C10		C8	
C3		C6		C5	
C9		C8		C10	
C5		C1		C3	
C7		C4		C7	
C1		C9		C1	
Valoraciones por pares de cada criterio respecto al de mayor importancia					
1º -> 2º	M + I	Mu + I		II	
1º -> 3º	+ I	Mu + I		II	
1º -> 4º	+ I	Ex + I		+ I	
1º -> 5º	Mu + I	Ex + I		+ I	
1º -> 6º	Mu + I	Ex + I		+ I	
1º -> 7º	Mu + I	Ex + I		Ex + I	
1º -> 8º	Ex + I	Ex + I		Ex + I	
1º -> 9º	Ex + I	Ex + I		Ex + I	
1º -> 10º	Ex + I	Ex + I		Ex + I	
ETIQUETAS LINGÜÍSTICAS:					
- II: Igualmente importante - M + I: Moderadamente más importante - + I: Más importante - Mu + I: Mucho más importante - Ex + I: Extremadamente más importante					

3.2. Resultados obtenidos

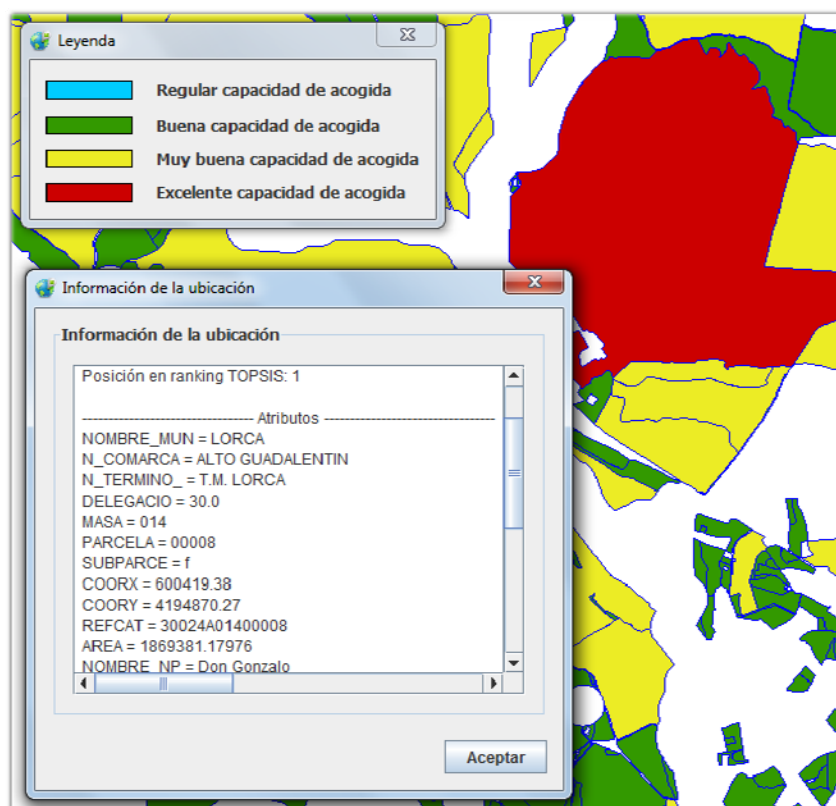
Una vez insertados todos los datos expuestos en el apartado anterior, Ubicaciones Óptimas v1.0 calculará un ranking de alternativas ordenadas de mejor a peor solución. También generará los informes con la información requerida por el usuario.

Figura 10: Gráfico con el peso de los criterios mostrado en informe PDF



Por último, el visor de mapas de Ubicaciones Óptimas v1.0 mostrará las mejores soluciones utilizando la tecnología SIG. En la Figura 11, puede observarse que el SAD ha encontrado una parcela del Término Municipal de Lorca como la mejor de todas las alternativas.

Figura 11: Mejor alternativa del problema según Ubicaciones Óptimas v1.0



4. Conclusiones

El problema de ejemplo comentado en el apartado 3 deja patente la potencia y eficacia de Ubicaciones Óptimas v1.0 para resolver problemas de localización. Y es que dicho problema quedó resuelto en menos de 10 minutos contando con más de 73.000 alternativas, que son las posibles soluciones. Además, la filosofía de funcionamiento del programa deja la puerta abierta a la hora de localizar instalaciones de cualquier tipo. Por tanto, se le ha sacado un buen rendimiento al concepto de flexibilidad, sin complicar en exceso el desarrollo del programa y la utilización del mismo a nivel usuario.

Cabe destacar la importancia de una buena configuración del Shapefile, ya que de ella depende totalmente el éxito de los resultados arrojados por Ubicaciones Óptimas v1.0. Esta tarea no es sencilla, y de hecho puede ser la parte más complicada del proceso de resolución, porque los atributos deben construirse a partir de capas temáticas que pueden ser de difícil acceso para el usuario. Además, hay que añadir el mayor de los inconvenientes a la hora de elaborar información SIG: los constantes cambios del mundo real, que implican un alto coste al procurar que los datos siempre estén actualizados.

Por último, hay que destacar la fuerte componente de subjetividad que afecta a la resolución de cualquier problema con este tipo de herramientas. Ya desde el primer paso, en el que se eligen los criterios de selección para la toma de decisión, se está introduciendo una parcialidad que afectará al resultado final. Para compensar la posible falta de objetividad del usuario, Ubicaciones Óptimas v1.0 permite la introducción de diferentes puntos de vista de expertos. Ahora bien, ¿quién confiere el título de “experto/a” a un individuo/a? ¿Dicho “experto/a” ha contextualizado correctamente el problema? Son preguntas que el usuario del programa deberá siempre tener presentes.

Así mismo, la evaluación de los resultados es un proceso imparcial. Por tanto y para finalizar, Ubicaciones Óptimas v1.0 debe ser entendida como una potente herramienta de ayuda a la decisión, pero nunca como un sustituto del decisor, ya que será su experiencia y buen hacer los que consigan llevar a buen puerto un problema de toma de decisión de acuerdo al entorno bajo el que se plantea.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con fondos FEDER por la DGICYT mediante el proyecto (TIN2011-27696-C02-01) y por La Junta de Andalucía (P11-TIC-8001), respectivamente.

Referencias

- Cables E., García-Cascales M.S., Lamata M.T., (2012). The LTOPSIS: An alternative to TOPSIS decision-making approach for linguistic variables: Expert Systems with Applications, Vol 39 (2), 2119-2126.
- García-Cascales, M.S., Lamata, M.T. y Sánchez-Lozano, J.M., (2012). Evaluation of photovoltaic cells in a multi-criteria decision making process, *Annals of Operations Research*, 199, pp. 373-391.
- Hwang C. L. y Yoon K. (1981). *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*, Springer, Berlin Heidelberg ed.
- Saaty T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York.
- Sánchez Lozano J. M. (2013). *Búsqueda y evaluación de emplazamientos óptimos para albergar instalaciones de Energías Renovables (EERR) en la costa de la Región de Murcia: combinación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Soft Computing (SC)*, PhD, Universidad Politécnica de Cartagena.

- Sánchez-Lozano J.M., Teruel-Solano J., Soto-Elvira P.L. y García-Cascales, M.S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods for the evaluation of solar farms locations: case study in south-eastern Spain. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. DOI.:10.1016/j.rser.2013.03.019.
- Turban E., Aronson J. E., Liang T.-P. y Sharda R. (2006). *Decision Support and Business Intelligence Systems (9th Edition)*.
- Zadeh L. A. (1965). *Fuzzy sets. Information and Control*, 8. Pp. 338-353.
- Zeiler M. (2010). *Modeling Our World. The ESRI Guide to Geodatabase Design. Second edition*, Esri Press.