

Joaquín BOSQUE SENDRA y Rosa C. GARCÍA

1. LAS APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los sistemas de información geográfica (para una definición detallada de esta herramienta se puede consultar el libro de Bosque Sendra, 1997, p. 21-24) se han convertido en un herramienta para el análisis geográfico de gran difusión. La causa principal de esto reside en la multitud de actividades en las que pueden ser útiles, las podríamos clasificar en dos grandes grupos:

A) *Gestión y descripción del territorio*: Es decir se trata de contestar a preguntas del tipo: ¿DÓNDE ESTÁN LAS "COSAS"? Por ejemplo: 1.º El mantenimiento, cartografía y control de grandes infraestructuras (redes de abastecimiento y evacuación de aguas, red telefónica,...), es decir los denominados sistemas AM/FM. 2.º El control y gestión de datos catastrales, los sistemas LIS/SIC. 3.º La gestión urbana y municipal.

B) *Ordenación y planificación del territorio*: En este caso se trata de responder a cuestiones del tipo: ¿DÓNDE DEBEN ESTAR LAS "COSAS"? Por ejemplo: 1.º Las tareas de planificación urbana. 2.º La Ordenación del territorio y la Planificación ambiental. 3.º El análisis y preparación de políticas sobre el transporte: flujo de tráfico, delimitación de áreas de influencia, cálculo de rutas óptimas. Ayuda a la conducción. 4.º El Geomarketing y/o la Geodemografía.

En cada uno de estos dos grandes tipos de aplicaciones los SIG realizan tareas diferentes y, por lo tanto, se utilizan distintas capacidades y funciones. En concreto, en la Gestión y descripción del territorio las funciones más empleadas son las siguientes: a) Las de "Entrada de datos", necesarias para construir las importantes bases de datos imprescindibles para esta actividad (digitalización espacial, integración de los aspectos temáticos, etc.). b) Las relacionadas con la organización y gestión adecuada de esta importante y

compleja base de datos. c) La Cartografía y presentación de resultados. d) Finalmente, la búsqueda selectiva de información.

En resumen, en este caso principalmente se utilizan las funciones básicas, las más semejantes a las existentes en otros tipos de herramientas: programas de cartografía asistida por ordenador, bases de datos, etc.

Por el contrario, en las actividades relacionadas con la ordenación y planificación del territorio las funciones más empleadas son otras, principalmente las siguientes: a) Búsqueda selectiva de información. b) Exploración y descripción de los datos. c) Generación de modelos explicativos y su confirmación con la información preexistente. d) Manipulación de la información: superposición, cambio de tipo de elemento geográfico, etc.

A partir de este momento nuestra atención se centra exclusivamente en las aplicaciones de los SIG a la Ordenación del territorio y la planificación ambiental.

2. FASES DE LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

Entendemos por planificación territorial las actividades, realizadas por cualquier agente público o privado, para establecer políticas que deben ser seguidas por la población y otros agentes económicos en cuanto al uso de los recursos naturales, la protección del medio ambiente y la localización óptima de las diferentes actividades.

Desde un punto de vista geográfico, el que nos interesa en este trabajo, la planificación territorial supone, principalmente, el establecimiento de los usos más apropiados para cada porción del territorio. La decisión sobre cuáles son estos usos depende, entre otros factores, de razones y criterios derivados de la conservación del ambiente natural y debe tener en cuenta tanto la vocación "intrínseca" de cada punto del territorio, determinada por su aptitud para cada uso o actividad, como el impacto potencial que tendrá sobre el medio ambiente la realización de una determinada actividad en ese punto del territorio.

Un aspecto importante de nuestro planteamiento es la distinción entre dos momentos o fases que se pueden establecer en la ordenación del territorio y la planificación ambiental:

- La primera fase (que no tiene carácter geográfico): establece los objetivos territoriales a alcanzar, por ejemplo: superficies dedicadas a cada tipo de ocupación, longitud de las carreteras a construir, cantidad de instalaciones y equipamientos a edificar, etc. En esta etapa inciden profundamente las disponibilidades económicas existentes y los objetivos políticos e intereses de la Administración y de los agentes sociales implicados.

- En una segunda fase (de base geográfica) la finalidad es la asignación "óptima" de la posición espacial para las ocupaciones antes seleccionadas, de las carreteras a construir, de los equipamientos, etc. Es en este momento donde una serie de nuevas herramientas de análisis y planificación territorial, que vamos a discutir en este trabajo, tienen su aplicación, entre estas herramientas destacan los Sistemas de información geográfica.

No obstante, es evidente que los resultados alcanzados en segunda fase pueden afectar a la definición de los objetivos de la primera, de modo que existe algún tipo de ciclo de "realimentación" en todo el proceso. Y, por lo tanto, las citadas herramientas inciden, finalmente, en todos los momentos de la planificación.

El objetivo principal de este texto no es una discusión teórica sobre el significado real de la planificación territorial (sobre ello consultar, por ejemplo, Otero, 1993, pp. 11-20), sino el planteamiento, mucho más específico y limitado, de las funciones que las nuevas herramientas geográficas, los ya mencionados Sistemas de Información Geográfica, pueden cumplir en la difícil tarea de desarrollar una útil planificación del territorio.

3. PAPEL DE LOS SIGS EN LA PLANIFICACIÓN AMBIENTAL Y LA ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

En estas actividades los nuevos instrumentos de análisis geográfico pueden cumplir diferentes funciones en las distintas etapas en que se suele dividir un proceso de planificación (Arentze, Borgers y Timmerman, 1996).

1.º En la fase de **Identificación del problema**, previa a la planificación propiamente dicha, los SIG son muy útiles por su capacidad de analizar los datos geográficos que definen el problema a tratar y a resolver con la planificación territorial y ambiental. Facilitan la Cartografía de los diferentes aspectos que inciden en la cuestión a conocer; permiten, mediante la superposición y otras formas de manipulación de la información, combinar datos y observar algunas de sus interrelaciones. No obstante, sería necesaria una importante ampliación de las capacidades exploratorias de los SIG actuales para mejorar su uso en este sentido (Bosque Sendra, 1996). Ya hace algún tiempo que se ha ido insistiendo en la grave insuficiencia de las técnicas habitualmente integradas en los programas SIG actuales para permitir una descripción en profundidad de las características espaciales y temáticas de los datos integrados en un SIG. El objetivo futuro sería la integración dentro de los programas SIG de funciones potentes de análisis estadístico, en especial de su enfoque exploratorio (Hoaglin y Mosteller, 1983; Hoaglin, Mosteller y Tukey 1985). Igualmente, están en desarrollo nuevos tipos de procedimientos de exploración donde se combina el análisis simultáneo e interactivo de los aspectos

temáticos y espaciales (Bailey y Gatrell, 1995; Densham, 1996; Haslett, Wills y Unwin, 1990).

2.º La etapa de **Especificación de los objetivos** es fundamental en la planificación territorial. Ya hemos indicado que esta tarea responde a la consideración de los criterios económicos y políticos generales y, por lo tanto, los SIG ocupan un papel secundario en esta fase. Normalmente, los SIG existentes en el mercado no disponen de capacidades para la visualización simultánea de diferentes objetivos y de las interrelaciones entre ellos, por lo que su empleo en esta tarea no es habitual. En cualquier caso, las posibilidades de visualización y cartografía existentes en los SIG siempre constituyen una ayuda para estas actividades.

3.º La fase de **Generación de alternativas**: esta actividad está basada en la combinación de los diferentes datos existentes sobre el problema y en el uso de técnicas y modelos que permitan generar diferentes soluciones a la cuestión. Los SIG están especialmente bien preparados para estas actividades, debido a sus capacidades para superponer y combinar estratos temáticos diferentes. Aún así es importante ampliar estas posibilidades, muy en especial integrando o relacionando los SIG con nuevos tipos de modelos matemáticos, en concreto los que intentan explicar problemas de tipo ambiental o social y económico. La literatura sobre todo ello es cada vez más abundante, un buen y amplio resumen se puede encontrar en Goodchild, Parks y Steyaert (1993) y Goodchild, Steyaert y Parks (1996), dos extensos volúmenes con buenos ejemplos de la variedad de trabajos existentes sobre el tema.

4.º Etapa de **Evaluación de las alternativas** frente a los objetivos. Una vez disponibles las diferentes soluciones al problema, resultado de la fase anterior, es necesario contrastar cada una de ellas con los objetivos establecidos en la segunda etapa. Para ello, por un lado, es necesario reunir y manejar nueva información, en lo cual un SIG puede ayudar ampliamente, y, por otro, es fundamental establecer una evaluación precisa de cómo cada alternativa obtenida cubre los objetivos pretendidos. Esta evaluación, para que sea adecuada a la complejidad de los problemas territoriales, requiere el uso de técnicas muy elaboradas, entre ellas destacan las de evaluación multicriterio (Barba-Romero y Pomerol, 1997; Barredo, 1996). Por ello, es importante, la integración de estos instrumentos con los SIG, más adelante comentamos con más detalle la cuestión.

5.º La fase de **Organización del plan**. Establecimiento de un programa coherente y sistemático donde se integren las distintas alternativas seleccionadas que la puesta en práctica del plan supone. En este caso el uso de los SIG es difícil, ya que estos instrumentos no tienen capacidades para esta actividad, más adecuado resulta la utilización de procedimientos de planificación de tareas como el PERT y otros semejantes.

6.º Finalmente, la etapa de **Control de la aplicación** del plan. Si un plan de ordenación territorial quiere tener éxito, es necesario establecer mecanismos que permitan su control y el rápido establecimiento de las diferencias entre lo que realmente ocurre y lo que el plan había determinado. Para ello, nuevamente, los SIG pueden ser una interesante herramienta, dada su capacidad de comparar dos realidades espaciales, la que había imaginado el plan, y la que realmente se está produciendo, utilizando para ello las funciones de superposición y combinación de diferentes estratos temáticos.

Como vemos los SIG son útiles en bastantes momentos del proceso de planificación, por ello parece cada vez más necesario su uso en estas tareas. No obstante, también son ciertas las mencionadas insuficiencias de los SIG actuales para resolver las complejas necesidades de la planificación territorial. Una tendencia importante es la del uso combinado de SIG y Técnicas de Evaluación Multicriterio para la más completa evaluación cuantitativa de las alternativas disponibles y para la formulación de planes coherentes de ordenación del territorio.

De acuerdo con todo lo indicado el uso más habitual de los SIG en la Ordenación territorial se corresponde con la selección del lugar o lugares más adecuados para situar alguna de las actividades humanas. Utilizando para ello gran número de criterios que se pueden considerar incidentes en la validez y adecuación de la decisión.

La variedad de problemas donde esta idea general se puede concretar es muy grande, los podemos clasificar de muchas formas, una de ellas es en función del tipo geométrico de los elementos a localizar. Esta clasificación responde, evidentemente, al papel de los SIG como herramientas de apoyo a la Ordenación del territorio, ya que en un programa SIG existen notables diferencias en las técnicas para analizar datos puntuales frente a las empleadas para datos lineales o poligonales, no obstante, dado el enfoque de este trabajo, en el cual nos interesa estudiar el papel de los citados instrumentos en la planificación, nos parece que resulta adecuado emplear esta clasificación de los problemas de la Ordenación territorial. De este modo tenemos tres tipos de cuestiones: a) localización óptima de instalaciones puntuales, b) trazado de infraestructuras lineales y c) asignación espacial de los usos del suelo poligonales. A continuación se estudia cada uno de ellos mas en detalle.

4. LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE ELEMENTOS PUNTUALES

En este caso se trata de la localización "óptima" de instalaciones con reducida extensión superficial, tales como escuelas, hospitales, comercios, vertederos, etc. En este caso, la insistencia principal reside en conseguir posiciones de los equipamientos e instalaciones que maximicen la eficacia y la

justicia espacial derivadas de su empleo por la población, las cuales están estrechamente relacionadas con el volumen y distribución de las distancias recorridas para utilizar estos equipamientos, y que, al mismo tiempo, reduzcan los posibles impactos ambientales.

La cuestión principal es, por lo tanto, la optimización (minimización o maximización, según el tipo de instalación) de las distancias que el conjunto de la población tiene que recorrer para utilizar alguna de las instalaciones planteadas y que, al mismo tiempo, no exista un desequilibrio demasiado intenso entre las distancias que unas personas tienen que atravesar frente a las que otras deben viajar. En este sentido los modelos de localización-asignación son una herramienta fundamental, en los últimos años se están desarrollando numerosos intentos para integrarlos dentro de los programas SIG comerciales (Bosque y Moreno, 1990).

Existe una amplia literatura que trata todos estos temas, en Bosque y otros (2000) se puede encontrar un amplio resumen de la cuestión; en Fernández y Bosque (1991) se muestra un ejemplo de análisis aplicado a los equipamientos sanitarios; en el artículo de Bosque y Franco (1995) se plantea el caso de las instalaciones no deseables; Joerin y Musy (1995) discuten el uso de técnicas de evaluación multicriterio en estas cuestiones; finalmente en Moreno (1988, 1987 y 1992) se detallan diversos aspectos metodológicos y técnicos del tema.

5. LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE ELEMENTOS GEOGRÁFICOS DE TIPO LINEAL

En esta ocasión el problema reside, por ejemplo, en la posición "óptima" del trazado de carreteras, caminos, líneas férreas, canales, y en general, todo tipo de infraestructuras lineales.

Como en el caso anterior aquí también se deben considerar criterios de diverso tipo: económicos (minimización de los costes de construcción) y ambientales (reducción de los impactos negativos que el trazado de la infraestructura produce).

En numerosos trabajos se han planteado estas cuestiones, entre ellos se pueden mencionar los siguientes: Brainard, Lovett, y Parfitt, 1996; Gómez y otros, 1996; Monzon, Gomar y Rey, 1992; Otero, 1993, pp. 165-191.

Existen diversos tipos de problemas sobre la localización óptima de elementos lineales: a) Localización de caminos/rutas óptimas sobre redes de transporte ya existentes. Ejemplo: establecer por donde debe viajar un repartidor de productos (leche, pan, etc.) de manera que el coste del viaje (o el tiempo de recorrido, etc.) sea mínimo. Clásico problema del viajante. b) Determinación del nuevo trazado de carreteras u otro tipo de infraestructuras

lineales. También en este caso se pueden plantear dos modalidades: 1.º Se dan por encontrados varios trazados diferentes a una nueva ruta. Es necesario evaluar cual es el mas adecuado. Cada ruta se evalúa por separado y se elige la que sea mas corta o barata de construir. 2.º Se emplea un procedimiento de búsqueda *ex-novo* de un recorrido óptimo teniendo en cuenta los criterios necesarios que miden lo adecuado que es el paso por cada punto del territorio.

La ruta óptima encontrada debe maximizar la adecuación o, lo que es lo mismo, minimizar los inconvenientes totales del trazado. Es posible emplear diversos tipos de criterios para determinar la localización óptima de una nueva infraestructura lineal: a) Económicos: establecen el coste de construir la ruta o las ventajas que su trazado supondrá para los usuarios o para las zonas servidas. b) Ambientales: se mide en cada punto del trazado el efecto negativo de la ruta para el medio ambiente.

Se trata de una versión del modelo aptitud/impacto (ventajas/inconvenientes de la ruta) que se estudiará mas abajo.

Soluciones para el problema de determinar una ruta/trazado óptimo sobre una red existente

Existen diversos algoritmos matemáticos que resuelven el problema. El más conocido es el de Dijkstra, que usualmente esta disponible en los programas de análisis de redes integrados en un SIG. En Daskin (1995, pp. 41-53) se puede encontrar una descripción de un algoritmo de este tipo. Por ejemplo, en el módulo Network de ARC/INFO se puede emplear la orden Route para llevar a cabo este proceso. En el caso de un SIG ráster (como IDRISI) la solución se puede esquematizar en lo siguiente (Gómez y Bosque, 2000): 1.º Establecer un mapa de fricciones unitarias, con valores desde 1 al máximo en las rutas ya existentes (fricción con valores en proporción inversa a la velocidad máxima en cada una de las rutas), en el exterior de las rutas valor -1 (imposibilidad de paso). 2.º Calcular el mapa de costes de recorrido acumulados hasta uno de los extremos de la ruta deseada, usando para ello el algoritmo COSTGROW (el cual no permite pasar por pixels con fricción de -1). 3.º Sobre este mapa de costes acumulados usar la orden PATHWAY con el otro extremo de la ruta como origen del camino. El resultado es una trayectoria que minimiza los costes acumulados de ir desde un extremo al otro de la ruta. El resultado difiere y es algo peor (mas largo y más costoso) que el obtenido con ROUTE de ARC/INFO.

Soluciones para el problema de determinar una nueva ruta de trazado óptimo sin una red existente

Para la variante del problema que consiste en evaluar trazados diferentes ya establecidos de una nueva ruta (Monzón, Gomar y Rey, 1992), el procedimiento sería el siguiente: a) Crear estratos temáticos de cada uno de los criterios que valoran la adecuación de que la nueva ruta pase por un punto del territorio, en estos mapas cada punto del territorio se valora en cuanto a su adecuación para recibir la ruta. b) Superponer cada trazado sobre los diversos criterios y extraer los valores de adecuación del paso de la ruta por cada punto. c) Combinar los valores de adecuación extraídos en cada trazado para construir un único valor de medida de adecuación. Se pueden usar métodos de evaluación multicriterio para llevar a cabo esa combinación. d) Elegir el trazado con el mayor valor de adecuación.

En la segunda variante del problema, la búsqueda de un recorrido óptimo para la nueva ruta, la solución se puede esquematizar así (Gómez y otros, 1996): a) Se crean estratos temáticos con los criterios de adecuación. b) Los criterios se convierten a valores de fricción unitaria o dificultad de paso de la ruta por cada punto. c) Se combinan las fricciones unitarias consideradas en un solo mapa de fricción unitaria, en este mapa el valor existente en cada punto del territorio mide lo costoso que resulta que la nueva ruta pase por ese lugar. d) Se obtiene un superficie de costes acumulados de ir hasta uno de los extremos de la ruta, el origen de ella, usando para ello la orden COST-PUSH de IDRISI. e) El algoritmo de búsqueda determina, en la anterior superficie de costos, por donde pasa la ruta de manera que se minimice el costo acumulado, se emplea para esto la orden PATHWAY. El algoritmo utilizado por PATHWAY es el de la máxima pendiente sobre la superficie de costos, es decir a partir del otro extremo de la ruta, el destino, se va buscando una trayectoria que discurra bajando siempre por la máxima pendiente en la superficie de costos hasta el origen de la nueva ruta. Esa es la ruta mas adecuada.

Este tipo de problema, buscar *ex-novo* una nueva localización para una ruta, es mas pertinente para su resolución con un SIG raster, por el contrario, como ya se ha indicado, el problema de la trayectoria óptima en un red de carreteras preexistente es mas propicio para su estudio con un SIG vectorial.

6. LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE POLÍGONOS

Es decir de los usos del suelo que se extienden por grandes porciones del territorio, se trata, por tanto, de la asignación "óptima" de las ocupaciones del suelo: urbano-residenciales, industriales, agrarias, protección natural, etc. Se

trata de una tarea muy habitual en los planes de ordenación urbana o territorial.

Existen numerosas modalidades para resolver el tema, una de la más conocida es la de establecer la capacidad de acogida de cada punto del terreno para recibir una actividad (Gómez Orea, 1992a y b; 1994).

La capacidad de acogida en un punto del territorio depende de su aptitud intrínseca para soportar tal tipo de uso y del impacto ambiental que la localización allí de ese uso genera en ese lugar y su entorno.

Determinadas las capacidades de acogida de todas las actividades previstas se puede elegir aquella donde, comparativamente, sea máxima la capacidad de acogida. En Barredo (1996) se puede encontrar una muy amplia discusión de toda la problemática del tema y en Eastman y otros (1993a y b, 1995) el pormenor de su inclusión en un programa SIG concreto: IDRISI para WINDOWS.

Una metodología para la asignación óptima de usos del suelo usando un SIG

El objetivo de este proceso es situar en el lugar mas adecuado cada una de las actividades previstas en la ordenación del territorio: uso residencial, cultivos, industria, etc.

En la fase no geográfica del proceso de planificación se deben establecer las metas de superficie que tienen que alcanzar, en la región en estudio, cada uno de estos usos del suelo. Es decir determinar la cantidad de superficie que en la región se debe destinar, para cubrir los objetivos pretendidos, a nuevo uso residencial, o a un nuevo uso industrial, etc.

Para poder llevar a cabo, de manera lo mas correcta posible, estos objetivos, se calcula la capacidad de acogida de cada "punto" del territorio para cada una de las actividades anteriores. El concepto de "punto" del territorio varía en función del tipo de representación digital que se este empleando en el proceso, es equivalente al pixel en un SIG raster o a un polígono en un SIG vectorial.

La capacidad de acogida en cada punto depende, como ya hemos mencionado, de dos cuestiones: a) La aptitud intrínseca del territorio (en ese punto) para recibir esa actividad. b) El impacto potencial que se puede producir en ese punto del territorio al situar allí esa actividad.

Por su parte la aptitud y el impacto pueden depender de varios criterios que modifican ambas cuestiones. Los criterios son hechos territoriales que, a su vez, se pueden expresar como factores, medidos en términos cuantitativos (que aumentan o disminuyen la aptitud o el impacto) y restricciones, expresados en una variable binarias (1/0: lugares aptos/no aptos).

Por ejemplo: la aptitud residencial puede depender de 3 factores: a) Geotecnia del terreno, que mide lo barato o fácil que resulta construir en cada punto del territorio. b) Distancia a lugares donde existen empleos, muy diferente según los lugares y que hace mas o menos atractivo cada lugar para edificar una zona residencial. c) Calidad visual alrededor de cada punto, también muy distinta y que se convierte, igualmente, en un elemento de atracción para viviendas. Y de 1 restricción: zonas inundables, los lugares que pueden ser inundados por los ríos no son edificables.

Por su parte, el impacto potencial de la actividad residencial se puede hacer depender, por ejemplo, de un factor: capacidad de uso agrario de la tierra, que cuantifica la posibilidad de llevar a cabo cultivos mas o menos rentables y que, por lo tanto, hace aumentar o disminuir el impacto que la construcción de residencias ocasiona en cada lugar. Y de 1 restricción: zonas de protección ambiental (por la ley), en estos lugares está prohibido la edificación.

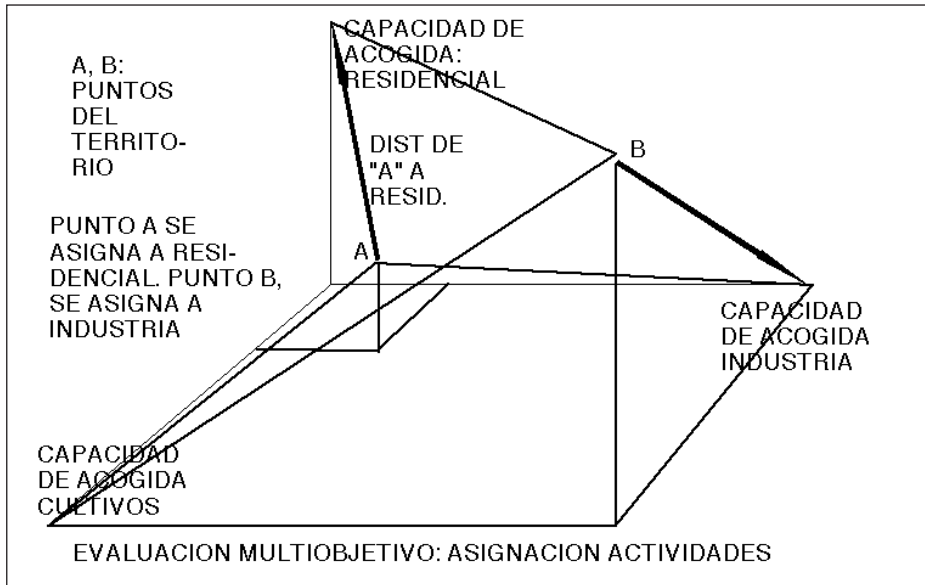
Una vez seleccionados los criterios que se consideran inciden en cada una de las dos magnitudes anteriores: aptitud e impacto, es necesario establecer el valor cuantitativo de aptitud/impacto de las categorías de los criterios que se van a considerar factores, y, simultáneamente, indicar las categorías que impiden la actividad (valor 0) en los criterios que se consideran restricciones. Existen diversos procedimientos para establecer esta valoración cuantitativa de la aptitud y el impacto, en Malczewski (1999, pp. 116-135) se puede encontrar una lista de muchos de ellos. Uno de los mas empleados es el denominado "Comparación entre pares de categorías" formulado por Saaty y descrito en detalle en Barredo (1996, pp. 125-129). De esta manera se asigna un conjunto de valoraciones de aptitud o de impacto a cada punto del territorio en función de los distintos factores.

El siguiente paso es combinar los criterios para hallar un único valor de aptitud y un único valor de impacto para cada punto del territorio: para ello se realiza una evaluación multicriterio y monoobjetivo. En este caso es posible emplear alguna regla de decisión que permita combinar las valoraciones realizadas por los distintos factores y restricciones en un único valor, entre estas reglas podemos mencionar dos (Barredo, 1996, pp. 64-65; Barba y Pomerol, 1997, pp. 167-170 y 243-252): a) La suma lineal (ponderada). y b) El análisis del punto ideal.

Establecidos los mapas de aptitud y de impacto se puede pasar a la obtención del valor de capacidad de acogida de cada uso, para ello se combinan los valores de aptitud e impacto anteriores, realizando una nueva evaluación multicriterio y monoobjetivo. En ella es posible volver a utilizar cualquiera de las dos reglas de decisión antes mencionadas: Suma lineal ponderada y análisis del punto ideal.

Con esto se ha generado un mapa de capacidad de acogida para cada uso del suelo, en dicho mapa cada punto del territorio contiene una puntuación

cuantitativa de la capacidad que ese punto tiene de recibir ese uso del suelo concreto. Ahora se puede proceder, finalmente, a la asignación óptima de una única actividades/uso del suelo a cada punto del territorio, partiendo de los mapas de capacidad de acogida para cada actividad obtenidos en la fase anterior. Esto se lleva a cabo mediante una evaluación multiobjetivo. Para ello se emplea el Análisis del punto ideal adaptado a varios puntos ideales (Barredo, 1996, cap. 4; Bosque y García, 1999). La figura 1 muestra un ejemplo del funcionamiento de este proceso. La idea es, asignar cada punto del territorio, al uso del suelo de cuyo punto ideal este más próximo, repitiendo el proceso hasta que se haya alcanzado la meta de superficie establecida para ese uso. En resumen, como salida final de todo el proceso se obtiene un mapa de usos del suelo, donde cada uno de ellos se encontrará en la posición que mejor capacidad de acogida relativa tenga frente a los otros que se han considerado en el proceso de asignación.



7. UN EJEMPLO DE ORDENACIÓN DEL TERRITORIO USANDO SIG Y TÉCNICAS EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Como ilustración de la metodología anteriormente planteada se describe la asignación óptima de usos del suelo realizada en la Cuenca del Río Tuy (Venezuela).

Los objetivos de este estudio venían dados por los planteamientos desarrollados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) para esta región, descritos en MARNR (1991a, pp. 29-32 y 1991b, Cap. 1, p. 47 y 1992). En estos textos se fijaban unas necesidades de nuevos tipos de usos en la región, en función del crecimiento galopante de la población y de la actividad industrial y de las necesidades de descongestionar y racionalizar el uso del territorio. De este modo, se establecieron las metas de superficie de diversos usos, tal y como se indican en la tabla 1, tomadas del mapa objetivo contenido en el citado documento del MARNR (1991a, pp. 29-32).

Tabla 1
Niveles jerárquicos relativos a los usos prioritarios

<i>Nivel jerárquico</i>	<i>Tipo de uso</i>	<i>Meta de superficie</i>	<i>% de cubrimiento</i>
1	Agrícola	21.097,35	19,08
2	Res. alta densidad	77.026,39	69,67
3	Industrial	149,31 (*)	0,13
4	Uso turístico recreac.	12.271,36	11,10

Fuente: Cálculos propios.

(*) Ésta es la superficie que fue digitalizada del mapa del MARNR, pero se adoptó una meta de 1.000 ha que no repercuten espacialmente y es más operacional para la representación de los resultados.

Según el orden indicado, para la Cuenca del Río Tuy en primer lugar, la prioridad de uso se inicia por el ordenamiento de la zonas agrícolas, luego las residenciales de alta densidad, el uso industrial y finalmente el uso turístico. Como puede observarse en la tabla anterior, dentro del área de estudio la mayor superficie a ordenar corresponde con el uso urbano que constituye una zona de alto conflicto por el crecimiento urbano incontrolado, que afecta a las zonas dedicadas a la agricultura. En tercer lugar, el uso industrial que no se pretende fomentar más allá de los actuales polígonos industriales y finalmente, el uso turístico recreacional, al cual se le otorga un poco más de superficie a la ocupada con respecto al valor digitalizado

Para cada uno de los usos del suelo mencionados se establecieron una serie de criterios que miden la aptitud y el impacto potencial en cada punto del territorio de la cuenca del río Tuy. Los criterios que pudieron ser establecidos finalmente fueron los siguientes.

Tabla 2
Resumen de los criterios de aptitud e impacto seleccionados

A) CAPACIDAD DE ACOGIDA PARA USO RESIDENCIAL DE ALTA DENSIDAD

1. *Selección de los criterios de aptitud* (entre paréntesis su ponderación para la combinación posterior)
Capacidad Portante del suelo para uso urbano (0.2795). Estabilidad de taludes (0.2795). Rangos de Pendientes (0.2018). Accesibilidad a la vialidad (0.079). Accesibilidad a zonas urbanas (0.0512). Tierras con régimen de propiedad adecuado para urbanizar (0.1089)

2. *Selección de criterios de impacto*
Clases agrológicas del suelo potencialmente productivas (0.5396). Tipos de formación vegetal (0.297). Áreas agrícolas existentes (0.1634)

3. *Restricciones*: Centros urbanos existentes. Zonas cubiertas por parques nacionales. Zonas de preservación en torno a cursos de agua. Cuerpos de agua. Áreas industriales existentes. Zonas de conservación paisajística.

B) CAPACIDAD DE ACOGIDA PARA DESARROLLO DE ZONAS AGRÍCOLAS

1. *Selección de los criterios de aptitud*
Clases agrológicas potencialmente productivas (0.482). Accesibilidad a la vialidad (0.2404). Accesibilidad a cursos de agua (0.1851). Tierras con régimen de propiedad adecuado para uso agrícola (0.1163).

2. *Selección de criterios de impacto*
Tipos de formación vegetal (0.6667). Estabilidad de taludes (0.3333)

3. *Restricciones*: Zonas cubiertas por parques nacionales. Zonas de preservación en torno a cursos de agua. Cuerpos de agua. Áreas industriales existentes. Centros urbanos existentes. Zonas de conservación paisajística. Zonas agrícolas existentes.

C) CAPACIDAD DE ACOGIDA PARA INSTALACIÓN DE INDUSTRIA PESADA

1. *Selección de los criterios de aptitud*

Capacidad Portante del suelo para uso industrial (0.2742). Estabilidad de taludes (0.2742). Rangos de Pendientes (0.1982). Accesibilidad a la vialidad (0.1047). Accesibilidad a zonas industriales (0.0829). Tierras con régimen de propiedad adecuado para uso industrial (0.0657).

2. *Selección de criterios de impacto*

Clases agrológicas del suelo potencialmente productivas (0.3397). Tipos de formación vegetal (0.2390). Cercanía a cuerpos de agua (0.2808). Áreas agrícolas existentes (0.1404)

3. *Restricciones:* Zona Protectora de Caracas. Zonas cubiertas por parques nacionales. Zonas de preservación en torno a cursos de agua. Cuerpos de agua. Áreas industriales existentes.

D) CAPACIDAD DE ACOGIDA PARA ZONAS DE DESARROLLO TURÍSTICO-RECREACIONAL

1. *Selección de los criterios de aptitud*

Paisaje con valor escénico (0.5286). Estabilidad de taludes (0.333). Accesibilidad a la vialidad (0.1384).

2. *Selección de criterios de impacto*

Clases agrológicas del suelo potencialmente productivas (0.6667). Áreas agrícolas existentes (0.3333).

3. *Restricciones:* Zonas urbanas presentes. Zonas cubiertas por parques nacionales. Zonas de preservación en torno a cursos de agua. Cuerpos de agua. Áreas industriales existentes. Zonas de vegetación de carácter singular.

Combinando, por separado, los criterios de cada uso se obtuvo un mapa de capacidad de acogida para cada una de las cuatro actividades mencionadas. A partir de los cuatro mapas de capacidad de acogida, operando con la regla de decisión del análisis del punto ideal, se generó un mapa que contenía en cada punto del terreno el uso más adecuado a sus condiciones, considerando que, al mismo tiempo, se alcanzasen las metas de superficie fijadas anteriormente.

La comparación de este mapa con el generado por el MARNR con otros procedimientos, muestra notables diferencias entre los dos, evidentemente

debidas a las muy diferentes metodologías utilizadas en cada caso, sin embargo, el resultado obtenido con el uso de SIG ofrece algunas ventajas sobre los conseguidos con otros medios, por ejemplo, se consideran de forma explícita las interacciones entre los diversos usos y su competencia por el terreno, aspecto que no es tan fácil de considerar en otros procedimientos.

8. CONCLUSIONES

De acuerdo con lo planteado podríamos resumir en dos los problemas para el uso adecuado de un SIG en la planificación ambiental.

- 1.º La insuficiencia de los instrumentos disponibles en los SIG para la generación de alternativas y soluciones que se integren al proceso de planificación para resolver un problema.
- 2.º Las dificultades e insuficiencias de la evaluación precisa y completa de las alternativas establecidas en relación a los objetivos definidos.

El primer problema se tiene que solucionar integrando en los SIG nuevas funciones de análisis y, más en concreto para la planificación ambiental, relacionando los SIG con el modelado ambiental. Las alternativas saldrán del uso de estos modelos ambientales, integrados o relacionados de alguna manera con los SIG.

La segunda cuestión se puede resolver combinando el uso de SIG con los procedimientos de evaluación multicriterio, que permiten comparar de modo preciso las diferentes soluciones y escoger alguna de ellas como la más conveniente. La integración de este tipo de técnicas en los SIG es posible y ya existen numerosas aplicaciones concretas.

Con estos dos desarrollos se pueden esperar mejoras sustanciales en la planificación ambiental y en el tratamiento de los graves problemas ambientales que ahora afectan a nuestro mundo.

BIBLIOGRAFÍA

- Arentze, T. A., Borgers, A. W. J. y Timmerman, H. . P. (1996): "Integrating GIS into the Planning Process", en M. Fischer, H. J. Scholten y D. Unwin (eds.): *Spatial Analytical Perspectives on GIS*. Londres, Taylor and Francis, pp. 187-198.
- Bailey, T. C. y Gatrell, A. C. (1995): *Interactive Spatial Data Analysis*. Harlow, Longman, 413 p. y un disco de ordenador.
- Barba Romero, S. y Pomerol, J.-C. (1997): *Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Alcalá de Henares, Servicio de publicaciones de la Universidad de Alcalá. 420 pp.

- Barredo Cano, J. I. (1996): *Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio*. Madrid, Editorial RA-MA, pp. 264.
- Bosque Sendra, J. (1997): *Sistemas de información geográfica*. Madrid, Ediciones Rialp, 2.º edición corregida, 451 pp.
- Bosque Sendra, J. (1996): "Técnicas de evaluación multicriterio y Sistemas de información geográfica en la ordenación del territorio", en *Portugal-España. Ordenación territorial del suroeste comunitario*. Coordinadores: A-J. Campesino Fernández y Carmen Velasco Bernardo. Universidad de Extremadura, Servicio de publicaciones, Cáceres, pp. 69-76.
- Bosque Sendra, J. y Franco Maass, S. (1995): "Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables". *Serie geográfica*, n.º 5, pp. 97-114.
- Bosque Sendra, J., García, R. (1999): "Asignación Óptima de Usos del Suelo Mediante Generación de Parcelas por medio de SIG y Técnicas de Evaluación Multicriterio". *VII Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica*. Mérida, Venezuela.
- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Moreno Jiménez, A. y Dal Pozzo, F. (2000): "Hacia un Sistema de ayuda a la decisión espacial para la localización de equipamientos". *Estudios geográficos* (en prensa).
- Bosque Sendra, J. y Moreno Jiménez, A. (1990): "Facility location analysis and planning: a GIS approach", *EGIS'90. First European Conference on Geographical Information Systems* Utrecht, EGIS Foundation, pp. 87-94.
- Brainard, J. Lovett, A. y Parfitt, J. (1996): "Assessing Hazardous Waste Transport Risks using GIS". *International Journal of GIS*, vol. 11, n.º 4, pp. 375-396.
- Daskin, M. S. (1995): *Network and Discrete Location Models. Algorithms and Applications*. Nueva York, J. Wiley.
- Densham, P. J. (1996): "Visual interactive locational analysis", en P. Longley y M. Batty: *Spatial Analysis: Modelling in a GIS environment* Cambridge, Geoinformation international, pp. 185-206.
- Eastman, J. R. y otros (1993a): *GIS and Decision Making. Explorations in Geographic Information Systems Technology*. Vol. 4, Ginebra, UNITAR European Office, 112 p. (3 discos).
- Eastman, J.; Toledano, J.; Kyen, P. (1993b): "An Algorithm for Multi-Objective Land Allocation Using GIS". *Proceeding. International Workshop on GIS*. August 19-22. Beijing: Chinese Academy of Science. p. 261-270.
- Eastman, J., Weigen, J., Peter, A. y Toledano, J. (1995): "Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 61, n.º 5, pp. 539-547.
- Fernández Gutiérrez, F. y Bosque Sendra, J. (1991): "Evaluación de la localización de los centros sanitarios en la ciudad de Granada (España). Un análisis basado en un SIG", en *Proceedings III Conferencia latinoamericana Sobre Sistemas de Información Geográfica*, Viña del Mar, Chile, octubre de 1991, pp. 409-409.
- Gómez, D. (1992a): *Evaluación del impacto ambiental*. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, España, pp. 221.
- Gómez, D. (1992b): *Planificación Rural*. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, España, pp. 396.

- Gómez, D. (1994): *Ordenación del Territorio. Una aproximación desde el Medio Físico*. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España, pp. 380
- Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2000): "Posibilidades y limitaciones del cálculo de caminos mínimos en Idrisi. Cálculo de rutas óptimas para el traslado de residuos tóxicos y peligrosos en el corredor del Henares", en *II Reunión de Usuarios de IDRISI*. Servei de Sistemes d'Informacio Geogràfica i Teledeteccio, Universitat de Girona, Girona, 2000. 20 p. (CD-ROM).
- Gómez Delgado, M., Rodríguez Durán, Ana E., Rodríguez Espinosa, V. M., Chuvieco, J. y Chuvieco, E. (1996): "Diseño de carreteras con un SIG. Factores económicos y factores ambientales". *Ciudad y territorio/Estudios territoriales*, vol. III, n.º 104, pp. 361-376.
- Goodchild, M. F., Parks, B. O. y Steyaert L. T. (Editores) (1993): *Environmental Modeling with GIS*. Nueva York, Oxford University Press, 488 pp.
- Goodchild, M. F., Steyaert L. T. y Parks, B. O. (Editores) (1996): *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. Fort Collins, CO., GIS World Books, 486 pp.
- Haslett, J., Wills, G. y Unwin, A. R. (1990): "SPIDER. An Interactive Statistical Tool for the Analysis of Spatial Data" *Int. J. Geographical Information Systems*, vol. 4, n.º 3, pp. 285-296.
- Hoaglin, D. C. y Mosteller, F. (1983): *Understanding robust and exploratory data analysis* Nueva York. J. Wiley.
- Hoaglin, D. C., Mosteller, F. y Tukey, J. W. (1985): *Exploring data, tables, trends, and shapes* Nueva York, J. Wiley.
- Joerin, F. y Musy, A. (1995): "Localisation d'un site par l'utilisation combinee de SIG et de methodes multicriteres", en *41e Journées du Groupe de travail européen "Aide multicritere à la décision"*. Lausanne, Ecole Polytechnique federale.
- Malczewski, J. (1999): *GIS and multicriteria decision analysis*. Nueva York, J. Wiley, 392 pp.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) (1991a): *Síntesis del Plan de Ordenamiento del Área Crítica con Prioridad de Tratamiento Cuenca del Río Tuy*. DGSP/A/Oficina Técnica Cuencas Lago de Valencia/Río Tuy. Proyecto VEN/90/002. MARNR-PNUD. Caracas, Venezuela, pp. 33.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) (1991b): *Plan de Ordenamiento del Área Crítica con Prioridad de Tratamiento Cuenca del Río Tuy*. Proyecto VEN/90/002. Oficina Técnica Cuenca del Lago de Valencia/Río Tuy. Caracas, Venezuela. pp. 130.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) (1992): *Sistema de Información Ambiental de la Cuenca del Río Tuy*. MARNR/FII/FP. Caracas, Venezuela, pp. 218.
- Monzón de Cáceres, A., Gomar, C. y Rey, E. (1992): "Método de ponderación de la traza para la evaluación de impactos ambientales de carreteras" *Estudios geográficos*, t. LIII, n.º 209, pp. 609-636.
- Moreno, A. (1992): "Los Sistemas de Información Geográfica en la planificación de equipamientos municipales" en Actas del 1.º Congreso de la AESIGYT, Madrid, abril de 1992. Publicada en *Comunicaciones 1.º Congreso AESIGYT, Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión territorial* Madrid, AESIGYT, 377-391.

- Moreno, A. (1988): "Una metodología de planificación de equipamientos educativos en medio rural: aplicación al Nordeste de la Comunidad de Madrid" *Ciudad y Territorio*, n.º 75-1, pp. 119-129.
- Moreno, A. (1987): "Planificación espacial de equipamientos públicos: el diagnóstico" en *Actas del X Congreso Nacional de Geografía* Zaragoza, AGE, vol. II, pp. 357-366.
- Otero, I. (1993): *Planificación territorial. Estudio de casos*. Madrid. Fundación Conde del Valle de Salazar.

RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una importante herramienta en las tareas de planificación ambiental y ordenación del territorio. Con ellos es posible resolver con más facilidad complejos problemas de asignación "óptima" de actividades al territorio, considerando para ello tanto su aptitud intrínseca, como el posible impacto ambiental de la localización, en ese punto del territorio, de una concreta actividad. Un importante elemento auxiliar en esta tarea son las Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) que, unidas a los SIG, forman una potente herramienta de gran utilidad y validez. Se estudiará las posibilidades de interconexión de SIG y EMC y su uso en resolver diversos tipos de problemas de planificación ambiental: localización de equipamientos e instalaciones de carácter ambiental (vertederos, centrales nucleares...); determinación de la traza de mínimo impacto medioambiental de infraestructuras lineales (carreteras, redes de tendido eléctrico...) y la asignación de nuevos usos y formas de ocupación del territorio (selección de zonas a proteger, determinación de polígonos industriales, etc.). Finalmente, se detalla una aplicación concreta de estas dos metodologías para resolver la asignación óptima de usos del suelo.

Palabras clave: Geografía aplicada, Planificación territorial. SIG y EMC, Asignación de recursos, Usos del suelo.

ABSTRACT

Geographical Information Systems (GIS) are important tools for territorial and environmental planning. Using GIS it is possible to solve complex problems for optimal allocation of human activities, taking into account their aptitude and potential environmental impact. The Multicriteria Evaluation (MCE) are auxiliary techniques together with GIS provide a very useful tool. In this paper we study the possibilities of using jointly MCE and GIS to solve different environmental problems: location of utilities (schools, hospitals...) calculation of minimum impact trace of highways, and optimal allocation of land use. Finally, an application of MCE and GIS for land allocation is shown.

Keywords: Applied Geography, Land Planning. GIS and MCE, Recourses allocation, Land Uses.

RESUME

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont un important outil dans les tâches de planification de l'environnement et aménagement du territoire. Avec eux il est possible de résoudre plus facilement de complexes problèmes d'attribution "optimale" d'activités au territoire. Pour cela, on considère non seulement son aptitude intrinsèque mais aussi le possible impact environnemental d'une activité concrète qui se localise sur un point du territoire. Un important élément auxiliaire dans cette tâche sont les Techniques d'Evaluation Multicritère (EMC) qui, avec les SIG, constituent un puissant outil très valable. On étudie les possibilités d'interconnexion entre les SIG et les EMC et leur usage pour résoudre différents problèmes de planification de l'environnement: localisation d'équipements et d'installations en rapport à l'environnement (décharges publiques, centrales nucléaires...); détermination de la trace d'impact minimum environnemental d'infrastructures linéaires (routes, réseaux électriques...) et l'attribution de nouveaux usages et formes d'occupation de l'espace (choix de zones à protéger, détermination de centres industriels...). Finalement, on détaille une application concrète de ces deux méthodologies afin de résoudre l'attribution optimale d'usages du sol.

Mots clé: Géographie appliquée, Aménagement du territoire. SIG et EMC, Attribution de ressources, Usages du sol.