

**Artigo**

Inés Santé Riveira · Rafael Crecente Maseda

# RULES - Sistema de Ayuda para la Planificación del suelo rural

Recibido: 26 Maio 2006 / Aceptado: 30 Xuño 2006  
© IBADER- Universidade de Santiago de Compostela 2006

**Resumen** En este artículo se justifica la necesidad de disponer de herramientas de soporte para el proceso de toma de decisiones sobre el uso del suelo en el medio rural. Como ejemplo de este tipo de instrumentos se presenta RULES (*Rural Land-use Exploration System*), un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial destinado a la ordenación de los usos del suelo. RULES está basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) sobre el que se han integrado otros componentes de software para la vinculación de modelos analíticos externos, los cuales dan soporte a tres etapas fundamentales en el diseño de un plan de usos del suelo rural; evaluación de la aptitud de la tierra, optimización de la superficie destinada a cada uso y localización espacial de la misma. Este sistema permite al usuario expresar sus preferencias y opiniones en cada fase del proceso, así como visualizar los resultados y consecuencias de las mismas en forma de escenarios de uso del suelo. La aplicación de RULES en la comarca de Terra Chá ha permitido generar de forma rápida y justificada planes alternativos de uso del suelo espacialmente explícitos.

**Palabras clave** Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial · planificación rural · usos del suelo.

**Abstract** In this paper the need for decision support tools for rural land use planning is justified. As an example of this kind of tools, a Spatial Decision Support System, RULES (*Rural Land-use Exploration System*) is described. RULES is based on a Geographical Information System (GIS), onto

which other software components have been integrated in order to link external analytical models, which correspond to the stages of a land use plan: land suitability evaluation, optimization of land use areas and land use allocation. This system allows the user to express his/her preferences and opinions in each phase of the planning process, as well as to visualize the results and their consequences in the form of land use scenarios. Its application in the Terra Cha region has provided alternative spatial land use plans in a quick and justified way.

**Keywords** Spatial Decision Support System · Planning in rural areas · Land Use.

## Introducción

El suelo es utilizado con muchos fines, algunos de los cuales son compatibles, pero, en la mayor parte de los casos, los usos del suelo son conflictivos, es decir, no pueden localizarse simultáneamente en la misma unidad de tierra. Esto origina la competencia entre diferentes actividades como la agricultura, la minería, la producción forestal, la conservación de hábitats, etc. Esta toma de decisiones sobre los usos del suelo es más acuciante en las sociedades modernas, donde el incremento de la presión demográfica y una economía mixta conllevan una mayor competencia entre los usos (Verheye, 1997). Además, esta planificación de usos del suelo es vital para el desarrollo de sistemas rurales sostenibles (Van Lier, 1998).

La finalidad de la planificación del uso del suelo es hacer el mejor uso posible de los recursos naturales, valorando las necesidades y la capacidad de la tierra para satisfacerlas, identificando y resolviendo conflictos entre usos competitivos y buscando soluciones sostenibles. Gómez Orea (1994) establece como objetivo de la ordenación del territorio la organización coherente, entre sí y con el medio, de las actividades en el espacio, de acuerdo con un criterio de eficiencia. En FAO (1993) se identifican tres objetivos para la planificación de usos del suelo; eficiencia, aceptabilidad y sostenibilidad. La eficiencia se consigue

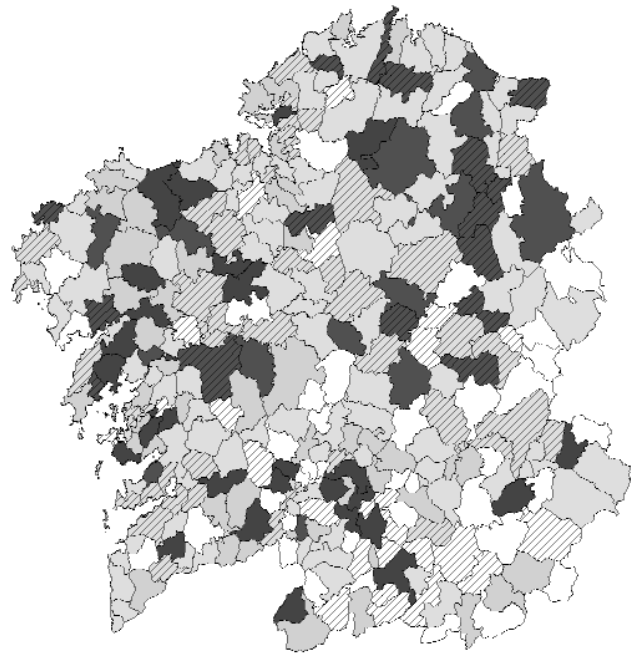
Inés Santé Riveira · Rafael Crecente Maseda  
Laboratorio del Territorio, Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela  
Escuela Politécnica Superior, Campus Universitario s/n  
27002 Lugo, España  
Tfno: 34982252231-ext. 23642. fax: 34982285926  
e-mail: [isante@lugo.usc.es](mailto:isante@lugo.usc.es) - [rcrecente@lugo.usc.es](mailto:rcrecente@lugo.usc.es)

asignando los diferentes usos a las tierras que producirán los mayores beneficios con el menor coste. La aceptabilidad consiste en que el uso del suelo debe ser socialmente aceptado. La sostenibilidad del uso del suelo implica satisfacer las necesidades actuales y al mismo tiempo conservar los recursos para las generaciones futuras.

El planeamiento y la ordenación de usos del territorio han estado tradicionalmente centrados en el suelo urbano, para el cual se han desarrollado modelos, métodos y trabajos de investigación desde diversas disciplinas. La ordenación del espacio rural, sin embargo, sólo ha sido considerada parcialmente y siempre con el objetivo último de incrementar la producción primaria. Sin embargo, los rápidos cambios que está experimentando el suelo rústico (la reducción de la actividad agraria, los procesos de urbanización difusa, la desaparición del paisaje cultural, la aparición de nuevas funciones del territorio como las áreas recreativas o de conservación, etc.) exigen la aplicación, no sólo de normas reguladoras de los usos, sino de planes e iniciativas concretas que definan el nuevo papel de los distintos espacios. Se está produciendo una liberación del suelo rural de sus usos tradicionales, generándose oportunidades para la introducción de nuevos usos o actividades. Esto exige una gestión activa del suelo que permita una evolución ordenada del medio rural y demanda herramientas y métodos para la ayuda a la toma de decisiones sobre el uso del suelo.

En el contexto gallego esta necesidad aparecía ya reflejada en la Estrategia Gallega para el Medio Rural (Consellería de Economía, 2000), en la cual se propone la elaboración y aplicación de Planes de Ordenación de Usos del Espacio Rural en Galicia, entendiendo éstos como ejes de acción prioritarios para el desarrollo rural. En esta línea el Parlamento gallego aprobó en 2002 una iniciativa en la que instaba a la Xunta de Galicia a presentar un proyecto de medidas legislativas para la ordenación del uso de las tierras agrarias, al considerar este tema "*uno de los problemas fundamentales del campo gallego*". En diciembre de este mismo año se aprobó la *Ley 9/2002, de 30 de diciembre, de Ordenación Urbanística y Protección del Medio Rural de Galicia* modificada por la *Ley 15/2004, de 29 de diciembre, de Ordenación Urbanística y Protección del Medio Rural de Galicia*, cuyos objetivos incluyen, entre otros, la preservación del medio físico de Galicia y la armonización de la ordenación y conservación de los recursos naturales y paisajísticos con el mantenimiento, diversificación y desarrollo sostenible del territorio. Sin embargo, hasta el momento, tan sólo 28 de los 316 municipios de Galicia poseen un Plan General de Ordenación Municipal aprobado según esta ley (Figura 1). Del mismo modo, la modificación de la ley de concentración parcelaria de Galicia obliga a la elaboración de planes de ordenación de usos en las zonas concentradas. A nivel europeo, la Comisión Europea publicó la *European Spatial Development Perspective* que anima a los estados miembros a adoptar políticas, programas y planes de ordenación territorial con una mención específica al suelo rural.

Todas estas políticas públicas pretenden gestionar los riesgos y oportunidades derivados de los cambios



|   | Fecha plan     | Nº municipios | Población 2002 |
|---|----------------|---------------|----------------|
| ■ | Posterior 2002 | 28            | 306.031        |
| ■ | 1998-2002      | 51            | 659.518        |
| ■ | 1985-1997      | 140           | 1.384.998      |
| ■ | Anterior 1985  | 31            | 188.674        |
| □ | No tienen      | 65            | 198.149        |
| ▨ | En tramitación | 88            | 980.043        |

Figura 1.- Estado del planeamiento en los municipios de Galicia

económicos, demográficos y sociales que está experimentando el espacio rural, donde se localizan recursos naturales esenciales (agua, suelo, paisaje, producción primaria, etc.) que pueden verse afectados por estos procesos.

Según Bani (2003) la planificación tiene dos aspectos: el político y el técnico. El proceso político establece los objetivos del plan y arbitra entre intereses contrapuestos. La parte técnica asegura que el plan sea viable y debe incluir el conocimiento de los especialistas en producción agraria, economistas y demás expertos. Pease (1990) concluye que el análisis técnico debe ser separado de las consideraciones políticas. El papel de los técnicos en la planificación de usos es la generación de un espacio de posibles soluciones a partir de la información de la evaluación física, ambiental, económica y social de la tierra, definiendo diferentes escenarios de utilización del suelo. Los escenarios actuales y potenciales son generados y evaluados como parte del proceso de toma de decisiones y del desarrollo de políticas de ordenación del territorio. Estos escenarios cumplen una doble función; ayudar a reunir y ensamblar piezas individuales de información de forma que presenten las relaciones causales entre las alternativas y sus consecuencias, y ensanchar el rango de alternativas consideradas eliminando juicios prematuros (Xiang & Clarke, 2003). Para mostrar a la sociedad los diferentes

escenarios de planificación pueden utilizarse mapas de usos óptimos del suelo con el fin de negociar un plan final de uso del suelo que integre la mayoría de los intereses sociales con la conservación de los recursos naturales (Spinney, 1999).

En este artículo se presenta un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial que proporciona un conjunto de métodos para la generación de alternativas de gestión del uso del suelo, que sirven de orientación para el diseño de políticas públicas y estrategias de ordenación del territorio. Estos estudios exploratorios de diferentes escenarios de uso del suelo contribuyen a una discusión más transparente sobre los objetivos políticos, mostrando las posibilidades técnicas y las consecuencias de determinadas decisiones. Este sistema constituye una herramienta interactiva, que proporciona los medios para incluir el conocimiento experto y las preferencias de los planificadores en la toma de decisiones.

## Métodos y sistemas para la planificación del suelo rural

El proceso de planificación del suelo rural comprende varias etapas, las cuales requieren distintos tipos de estudio. El sistema presentado en este trabajo incorpora tres etapas fundamentales de este proceso: i) evaluación de la aptitud de la tierra para cada uno de los usos agroforestales, ii) optimización de la superficie de los distintos usos y iii) asignación espacial de los mismos. Las primeras aplicaciones informáticas diseñadas para la planificación de usos contemplaban tan sólo la evaluación de la aptitud de la tierra, entre ellas se puede destacar *ALES* (Rossiter, 1990), *MicroLEIS* (De la Rosa et al., 1992) o *ArcviewLESA*. También son numerosos los sistemas diseñados para el análisis de la superficie destinada a cada uso del suelo, por ejemplo, *GOAL-QUASI* (Van Ittersum, 1995) o *ADELAIS* (Siskos et al., 1994). El único SIG comercial que incluye herramientas para la planificación de usos del suelo es *IDRISI* (Eastman et al., 1995), el cual incorpora módulos para la evaluación de tierras y la ordenación espacial de usos del suelo. Actualmente existen numerosas metodologías y aplicaciones informáticas destinadas a uno o varios de estos estudios, sin embargo, sólo unas pocas, como *What-If* (Klosterman, 2001) o *SIRTPLAN*, integran las tres etapas anteriormente citadas. Gran parte de las aplicaciones informáticas destinadas a la planificación territorial están orientadas a la planificación urbana, por ejemplo, *CommunityViz* (Kwartler & Bernard, 2001) o *Smartplaces* (Croteau et al., 1997). Existen otros sistemas diseñados específicamente para usos agroforestales, entre ellos se encuentran *LADSS* (Matthews et al., 1999), *AEZWIN* (Fischer et al., 1998), *LUPAS* (Roetter et al., 2005) y *NELUP* (Watson & Wadsworth, 1996). *LADSS* incorpora las etapas de evaluación de tierras, asignación espacial de usos y evaluación del impacto ambiental y *AEZWIN* y *LUPAS* la evaluación de tierras y la optimización de superficies.

Todos estos programas actúan como Sistemas de Ayuda a la Decisión - SAD (*Decision Support Systems – DSS*),

algunos de ellos como Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial – SADE (*Spatial Decision Support Systems – SDSS*) y dentro de estos algunos constituyen Sistemas de Ayuda a la Planificación – SAP (*Planning Support Systems – PSS*). Un SAD es cualquier sistema informático, desde un gestor de bases de datos a un modelo de simulación u optimización matemática, diseñado para alcanzar un mayor grado de efectividad en los procesos de toma de decisión de un problema semiestructurado (Malczewski & Ogryczak, 1995). Un SADE se define como un sistema diseñado para ayudar a la toma de decisiones en problemas espaciales complejos y no estructurados (Densham, 1991) e implica la integración de un SIG con modelos analíticos o de ayuda a la decisión (Alshuwaikhat & Nassef, 1996). Los SAP incluyen una gran diversidad de herramientas geotecnológicas, SIG y sistemas de modelización espacial, desarrolladas para ayudar en una o varias etapas del proceso de planificación. Los SAP tienen mucho en común con los SADE, sin embargo, según Geertman & Stillwell (2003), los SAP prestan especial atención a cuestiones estratégicas y problemas a largo plazo y pueden ser diseñados para facilitar la interacción y discusión entre grupos de interés, mientras que los SADE son concebidos generalmente para soportar procesos de toma de decisión a corto plazo o por individuos aislados.

La innovación del SAP presentado en este artículo consiste en incorporar en una única herramienta las tres etapas anteriormente mencionadas e integrarlas de modo que los resultados de una puedan ser empleados como información de partida en otra. Para ello se han incorporado en un SIG varios modelos de análisis para cada una de las tres etapas, las cuales se corresponden con los tres módulos del sistema: 1) evaluación de tierras, 2) optimización de superficies y 3) localización espacial. Estos módulos están conectados funcionalmente, de forma que los resultados de unos son *input* para los otros. La retroalimentación entre módulos permite refinar y mejorar el resultado final, así como identificar nuevos factores implicados en el proceso de planificación.

## Arquitectura del sistema RULES

A continuación se describen los tres módulos que componen el sistema, cada uno de los cuales puede ser utilizado independientemente.

### Módulo de evaluación de tierras

El módulo de evaluación de tierras se ha implementado en el componente SIG del sistema, empleando los objetos de programación de GeoMedia Grid® y GeoMedia Professional® para aplicar las técnicas de reclasificación, superposición y álgebra de mapas necesarias para la implementación de los métodos de evaluación de tierras. Estos métodos incluyen dos técnicas de evaluación multicriterio, la suma lineal ponderada y el análisis de punto ideal, y el esquema FAO con puntuación de las limitaciones (Santé & Crecente, 2005).

La suma lineal ponderada es el procedimiento de evaluación multicriterio más comúnmente empleado para la obtención de mapas de aptitud para una actividad (p. ej. Mendoza, 1997; Eastman et al., 1998; Weerakoon, 2002). Para su aplicación el usuario debe introducir los mapas *raster* correspondientes a los factores de evaluación, los cuales deben estar estandarizados a una escala común, y los factores de ponderación de los mismos, cuya suma debe ser la unidad.

El procedimiento para el análisis de punto de ideal es descrito por Barredo (1996) y para su ejecución, además de los factores de evaluación y el peso de los mismos, el usuario debe introducir el valor de un parámetro utilizado para el cálculo de la distancia al punto ideal, el cual indica el grado de compensación entre factores (Figura 2).

**Figura 2.-** Comando para la obtención de mapas de aptitud mediante el análisis de punto ideal

Para la aplicación del esquema FAO el usuario debe reclasificar los valores de cada factor de evaluación en las cinco clases de aptitud del esquema FAO (FAO, 1976); A1, muy apto, A2, apto, A3, marginalmente apto, N1, actualmente no apto y N2, permanentemente no apto. Según la clase de aptitud asignada a cada valor de un factor el programa le asigna una puntuación de limitación (Triantafyllis et al., 2001); S1 – 0 puntos, S2 – 1 puntos, S3 – 3 puntos, N1 – 9 puntos, N2 – 27 puntos. La suma de la puntuación de limitación de los factores introducidos proporciona la 'puntuación de limitación acumulada'. Por último, se debe seleccionar una función de pertenencia *fuzzy* lineal o sigmoideal para la obtención de la aptitud a partir de la estandarización de la puntuación de limitación acumulada.

### Módulo de optimización de superficies

El módulo de optimización de superficies se ha desarrollado a partir de librerías de LINDO API®, las cuales se han utilizado para construir una aplicación de optimización

integrada en el SIG para la resolución de un modelo de programación lineal. En este modelo las variables de decisión corresponden a los usos del suelo y las funciones objetivo incluyen la maximización del margen bruto, del empleo rural, de la superficie cultivada y del grado de naturalidad de la vegetación, así como la minimización de los costes de producción y del empleo de agroquímicos. Este modelo permite explorar las distintas posibilidades de uso del suelo, en términos de superficie asignada a cada utilización de la tierra, en función de las prioridades o niveles de aspiración asignados a cada objetivo. Para ello, en primer lugar, el planificador debe definir el modelo, seleccionando los objetivos, los usos del suelo, los coeficientes técnicos y las restricciones. A continuación el usuario podrá escoger entre técnicas con asignación de preferencias *a posteriori*, método de las restricciones (Goicoechea et al., 1982) o método de las ponderaciones (Cohon, 1978), *a priori*, programación por metas (Cohon, 1978), o interactivas, método STEP (Cohon, 1978) (Figura 3) o asignación interactiva de prioridades (Lu et al., 2004), para la resolución del modelo.

**Figura 3.-** Formulario para la aplicación interactiva del método STEP

### Módulo de localización espacial

Los métodos para la asignación espacial de los usos del suelo se han implementado mediante las herramientas de análisis espacial y modelado cartográfico proporcionadas por los objetos de programación de GeoMedia Grid® y GeoMedia Professional®. Además se ha programado en Visual Basic un algoritmo basado en el *simulated annealing*, implementado en librerías independientes que posteriormente se han integrado en el sistema.

En este módulo se utilizan como información de partida los mapas de aptitud y las superficies calculados en los dos módulos anteriores. RULES proporciona tres métodos para la asignación espacial de los usos del suelo; la optimización

jerárquica (Carver, 1991), el análisis de punto ideal para objetivos conflictivos (Barredo, 1996) y un nuevo algoritmo basado en el *simulated annealing*. La optimización jerárquica es aplicable cuando sólo se conocen las prioridades de los usos, mientras que para la aplicación del análisis de punto ideal es preciso asignar un peso numérico específico a cada uso. Estos dos métodos se basan exclusivamente en la aptitud de cada celda del mapa para los distintos usos, mientras que el algoritmo de optimización desarrollado en base al *simulated annealing* permite considerar también la compacidad de las áreas asignadas a cada uso (Figura 4).

**Figura 4.-** Formulario para la asignación espacial de los usos del suelo mediante el simulated annealing

## Caso de estudio

Terra Chá es la comarca más extensa de Galicia (1.832 km<sup>2</sup>) con una población de 47.210 habitantes, de los cuales 7.706 se dedican a la agricultura, actividad que ocupa el 53% de la superficie comarcal. Está conformada en su mayor parte por una amplia llanura de altitudes

comprendidas entre 400 y 500 m, donde se asientan los principales núcleos de población y una mayor actividad agraria, mientras que la zona meridional, donde el relieve es más accidentado y al altitud es mayor, se caracteriza por una menor población y actividad económica.

En la distribución actual de los usos del suelo en esta comarca pueden distinguirse cuatro zonas diferenciadas; i) la zona norte, caracterizada por una mayor altitud y pendiente, donde predominan las formaciones de matorral, los prados de montaña y los usos forestales (fundamentalmente pinos y especies caducifolias), ii) la zona oeste y sudoeste, donde coexisten amplias plantaciones de pinos con matorral y áreas mixtas de cultivo y arbolado, iii) la zona central, donde el uso más frecuente es el cultivo agrícola y en menor medida el forestal, y iv) la zona sudeste, dedicada casi exclusivamente a prados y cultivos forrajeros. En cifras globales los cultivos representan el 25,7% de la superficie comarcal, los pastos el 27,5%, el matorral el 26,6% y los usos forestales el 18,7% (INE, 2002).

Para la identificación de los usos a ordenar se han tomado como base los aprovechamientos de la tierra existentes en la comarca según las Estadísticas Agrarias 2001 del Sistema de Información Territorial de Galicia (SDC-Xunta de Galicia, 2003); maíz, trigo, patata, forrajes verdes plurianuales, hortalizas, frutales, prados, pastizales, eucalipto, especies forestales resinosas y especies forestales frondosas caducifolias.

Para cada uso se han identificado una serie de factores físicos y socioeconómicos que determinan la aptitud de la tierra (Tabla 1), los cuales se han introducido en el sistema como coberturas ráster con 2.695x2.846 celdas de 20x20 metros, estandarizadas a un rango de valores comprendido entre 0 y 1.

|                                                       | Maíz | Trigo | Otros cereales | Patata | Forraje plurianual | Otros forrajeros | Hortalizas | Frutales | Prado | Pastizal | Eucalipto | Resinosas | Frondosas caducifolias |
|-------------------------------------------------------|------|-------|----------------|--------|--------------------|------------------|------------|----------|-------|----------|-----------|-----------|------------------------|
| Aptitud mecanización, enraizamiento y riesgo erosión  | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        | X         | X         | X                      |
| Intensidad Bioclimática Libre                         |      |       |                |        |                    |                  |            |          |       |          | X         | X         | X                      |
| Régimen hídrico                                       | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Nº máquinas por explotación en el municipio           | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Superficie con concentración parcelaria               | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Tamaño de la parcela                                  | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        | X         | X         |                        |
| Accesibilidad (m lineales red viaria/m <sup>2</sup> ) | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        | X         | X         |                        |
| Distancia a mercados                                  | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Distancia a red viaria                                | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Nº explotaciones que comercializan/km <sup>2</sup>    | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Nº agroindustrias                                     | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Nº industrias forestales                              |      |       |                |        |                    |                  |            |          |       |          | X         | X         |                        |
| Superficie reforestada                                |      |       |                |        |                    |                  |            |          |       |          | X         | X         |                        |
| Inscritos REA s/población                             | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Margen Bruto Total medio de las explotaciones         | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Titulares con formación teórica                       | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Nº socios de cooperativas y SATs                      | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        |           |           |                        |
| Distribución actual de los usos del suelo (SITGA)     | X    | X     | X              | X      | X                  | X                | X          | X        | X     | X        | X         | X         | X                      |
| Mapa Forestal de España                               |      |       |                |        |                    |                  |            |          |       |          | X         | X         | X                      |
| Zonas protegidas bajo la Red Natura                   |      |       |                |        |                    |                  |            |          |       |          | X         | X         | X                      |

**Tabla 1.-** Factores empleados en la evaluación de la aptitud de la tierra para cada uso del suelo

Se seleccionaron los mapas de aptitud obtenidos con el análisis de punto ideal, ya que son los que presentan una distribución más equitativa de la superficie de la comarca entre las distintas clases de aptitud (Santé & Crecente, 2005).

A partir de estos mapas de aptitud se obtuvieron las restricciones de disponibilidad de tierra para el modelo de programación lineal implementado en el módulo de optimización de superficies, ya que se consideró como superficie disponible para cada uso aquella con una puntuación de aptitud superior a 0,7.

El primer paso para la determinación de las superficies óptimas para cada uso del suelo fue el ajuste de los parámetros del modelo. Se asignó cada uno de los 13 usos del suelo a una variable de decisión, se introdujeron los coeficientes técnicos de cada uso (margen bruto, coste de producción, mano de obra, empleo de agroquímicos y grado de naturalidad) y los valores de los términos independientes de las restricciones de disponibilidad de tierra, demanda y superficie total. Para la resolución del modelo se consideró un escenario económico, en el que se concedió preferencia a la productividad y rentabilidad económica de los aprovechamientos del suelo, lo cual se plasmó en los pesos, prioridades o niveles de aspiración asignados a cada objetivo (Tabla 2). Una vez definido el modelo y el escenario de planificación, se aplicaron las distintas técnicas multiobjetivo disponibles en el sistema para la resolución del mismo, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 3.

Se seleccionaron las superficies obtenidas con el método STEP por ser el que proporciona una mayor tasa de satisfacción de los dos objetivos económicos simultáneamente. La determinación de los pesos de cada uso del suelo se llevó a cabo mediante el proceso analítico jerárquico (Saaty, 1980), considerando que los usos más importantes en cada escenario son aquellos que han obtenido una mayor superficie en la resolución del modelo de programación lineal (Tabla 4).

Para obtener la localización espacial de los usos del suelo se aplicó en primer lugar el proceso de optimización jerárquica, indicando únicamente el orden de prioridad de los usos del suelo. A continuación se hizo uso de los pesos

|                         | Superficie (ha) | Superficie (n° celdas) | Peso   |
|-------------------------|-----------------|------------------------|--------|
| Maiz                    | 30.799          | 769.975                | 0,2037 |
| Trigo                   | 2.009           | 50.225                 | 0,0147 |
| Otros cereales          | 142             | 3.550                  | 0,0070 |
| Patata                  | 1908            | 47.700                 | 0,0108 |
| Forrajes plurianuales   | 27.835          | 695.875                | 0,1483 |
| Otros forrajeros        | 2.525           | 63.125                 | 0,0208 |
| Hortalizas              | 14.530          | 363.250                | 0,0557 |
| Frutales                | 224             | 5.600                  | 0,0083 |
| Prado                   | 31.473          | 786.825                | 0,2770 |
| Pastizal                | 4.629           | 115.725                | 0,0289 |
| Eucalipto               | 7.747           | 193.675                | 0,0401 |
| Resinosas               | 22.161          | 554.025                | 0,0773 |
| Fronchosas caducifolias | 27.607          | 690.175                | 0,1074 |

**Tabla 4.-** Superficies y pesos asignados a los usos del suelo en cada escenario

obtenidos mediante el proceso analítico jerárquico para la aplicación del análisis de punto ideal con objetivos conflictivos. Finalmente, la utilización del algoritmo heurístico permitió maximizar, además de la aptitud, la compactación de las áreas de cada uso del suelo. En una primera asignación se consideró únicamente el miembro de la función de coste relativo a la maximización de la aptitud, con el fin de poder comparar los resultados del algoritmo con los obtenidos en los dos métodos anteriores (Figura 5). En los tres escenarios el *simulated annealing* proporcionó una mayor aptitud global del mapa de usos del suelo, a expensas de una menor compactación de las regiones de un mismo uso (Tabla 5).

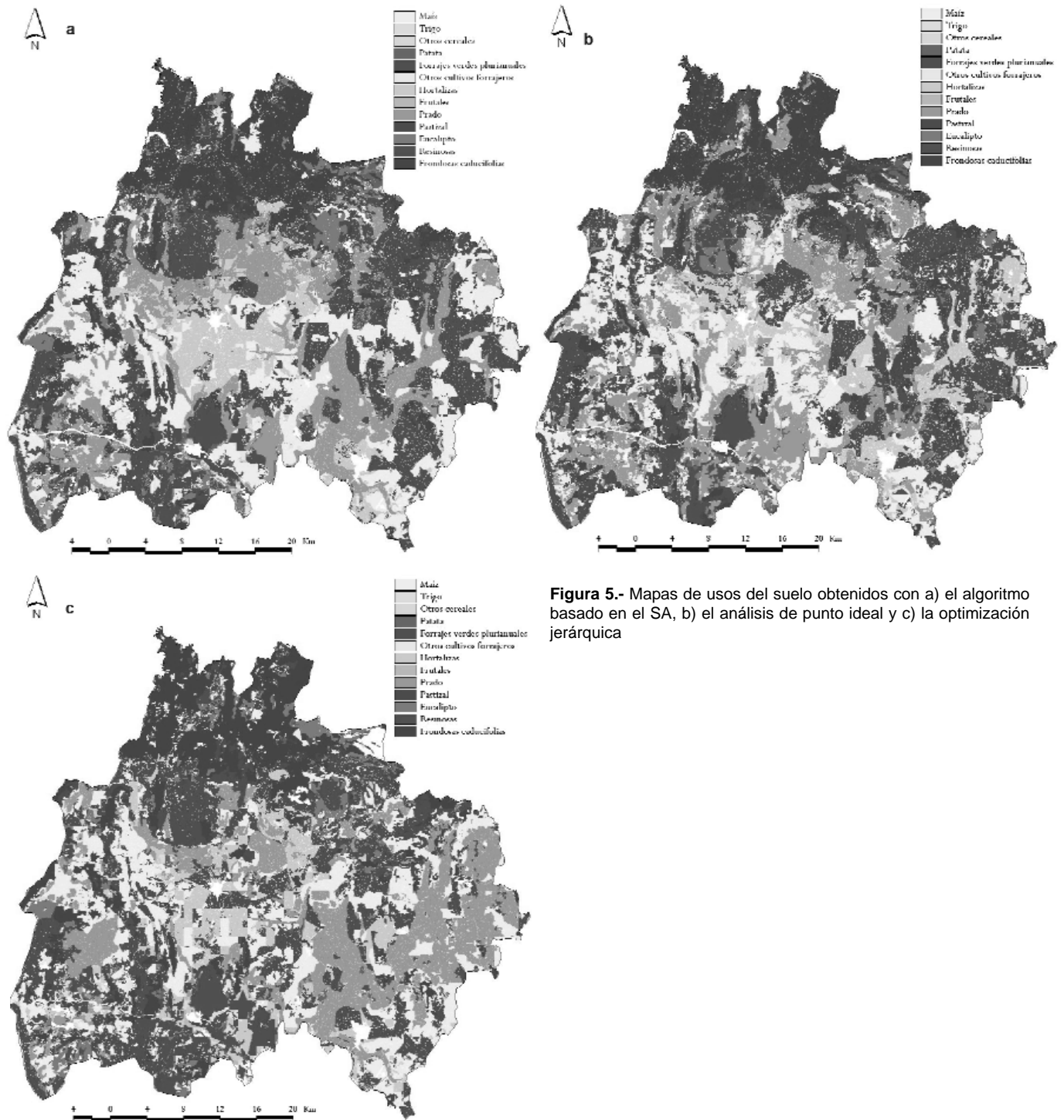
Posteriormente se aplicó el *simulated annealing* asignando un peso de 0,5 tanto a la maximización de la compactación como a la minimización de perímetros. La consideración de la compactación en la función de energía del algoritmo heurístico permitió mejorar notablemente la distribución espacial de las regiones de uso del suelo; el perímetro total de las regiones se redujo en un 25% (21.887,32 km) y la superficie media se multiplicó por 5 (23,27 ha), a expensas

|                                                                           | Margen Bruto | Coste producción | Superficie cultivada | Empleo rural | Grado naturalidad | Agroquímicos |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------|-------------------|--------------|
| Programación por metas (pesos)                                            | 25           | 20               | 15                   | 10           | 5                 | 1            |
| STEP (% disminución de tasa de satisfacción)                              | 0            | 5                | 10                   | 15           | 20                | 25           |
| Asignación interactiva de prioridades (prioridad / % variación permitida) | 1/25         | 2/20             | 3/15                 | 4/10         | 5/5               | 6/-          |

**Tabla 2.-** Pesos y prioridades asignados a cada objetivo

|                                                                           | Margen Bruto | Coste producción | Superficie cultivada | Empleo rural | Grado naturalidad | Agroquímicos |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------|-------------------|--------------|
| Programación por metas (pesos)                                            | 25           | 20               | 15                   | 10           | 5                 | 1            |
| STEP (% disminución de tasa de satisfacción)                              | 0            | 5                | 10                   | 15           | 20                | 25           |
| Asignación interactiva de prioridades (prioridad / % variación permitida) | 1/25         | 2/20             | 3/15                 | 4/10         | 5/5               | 6/-          |

**Tabla 3.-** Tasas de satisfacción de cada objetivo obtenidas con las distintas técnicas



**Figura 5.-** Mapas de usos del suelo obtenidos con a) el algoritmo basado en el SA, b) el análisis de punto ideal y c) la optimización jerárquica

|                          | <b>Optimización jerárquica</b> | <b>Análisis de punto ideal</b> | <b>Simulated Annealing</b> |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Aptitud                  | 2.927.252                      | 2.960.778                      | 3.051.305                  |
| Superficie media (ha)    | 11,63420                       | 11,48406                       | 4,60                       |
| Longitud perimetros (km) | 24.751,12                      | 27.492,6                       | 29.166,64                  |
| Nº regiones              | 15.741                         | 15.791                         | 40.198                     |
| Mayor región (ha)        | 16.842,48                      | 18.002,04                      | 21.294,68                  |
| Menor región (ha)        | 0,04                           | 0,04                           | 0,04                       |
| Tiempo de cálculo        | 45 min.                        | 7 h. 30 min.                   | 4 h.                       |

**Tabla 5.-** Indicadores para la evaluación de los mapas de usos obtenidos con los tres métodos de asignación espacial

de una pequeña reducción (0,15%) de la aptitud (3.046.645). Sin embargo, el tiempo de cálculo demandado por el algoritmo se elevó a 12 h.

## Resultados y Discusión

En este artículo se presenta un SAP destinado a la planificación del suelo rural que, a pesar de ser amigable y fácilmente utilizable por usuarios no entrenados, posee un fundamento teórico bien desarrollado basado en la teoría de la decisión. Se ha alcanzado una adecuada compensación entre la precisión científica y la aplicabilidad bajo restricciones de tiempo, información y personal experto. La integración del SIG con paquetes informáticos externos ha permitido implementar un proceso completo de generación de planes alternativos de uso del suelo.

Entre las fortalezas del sistema pueden citarse la flexibilidad a cualquier conjunto de datos, la interactividad con el usuario y la adaptación a las diversas estrategias de planificación y puntos de vista de los agentes implicados en el proceso de planificación. Asimismo, el proceso subyacente tras el sistema es intuitivo y, como consecuencia, inmediatamente comprendido por los planificadores. A pesar de la complejidad de los aspectos operacionales e informáticos, la estructura de RULES resulta fácilmente asimilable por el usuario. El sistema se estructura en tres etapas con las que los planificadores están familiarizados; la evaluación de tierras es uno de los procedimientos más comúnmente empleados en planificación, la optimización de superficies se relaciona con las prácticas de estimación de la demanda de un uso del suelo y la localización de una actividad en su emplazamiento más idóneo es también un problema frecuente en el diseño de planes de uso del suelo. Otra ventaja es la disponibilidad dentro de cada módulo de un conjunto de técnicas diferentes, lo que permite al planificador seleccionar la más apropiada para cada situación concreta. La posibilidad de seleccionar entre una serie de alternativas de análisis concede gran flexibilidad al sistema, ya que se podrá aplicar un método u otro en función de la información, del grado de intervención del usuario o del momento de toma de decisión más adecuado según las circunstancias.

El sistema ha sido aplicado a la comarca de Terra Chá para ilustrar su potencial como herramienta de ayuda a la decisión. Se ha comprobado la facilidad de utilización del sistema, así como las potencialidades que posee para la exploración de escenarios de uso del suelo. La eficacia del sistema para la resolución de problemas de gran tamaño o escala (7.669.970 celdas), que implican el análisis de gran cantidad de datos espaciales, ha quedado demostrada. Aunque los resultados obtenidos proporcionan una buena indicación para una etapa inicial del proceso de planificación, la elaboración de un plan real para esta zona requeriría una modelización más detallada, que incluyera un estudio más en profundidad de la comarca, la revisión de la legislación, trabajo de campo, encuestas a la población

local, etc. Sin embargo, RULES aporta de un modo rápido, simple y transparente una primera aproximación para el desarrollo del plan de usos del suelo final.

A pesar de tratarse de una herramienta interactiva que promueve el debate entre distintos grupos de interés, una de sus principales limitaciones es la carencia de un modelo matemático que permita considerar simultáneamente la opinión de distintos usuarios, lo cual facilitaría en gran medida la participación pública en el proceso de planificación. Gran parte de los puntos débiles del sistema se han identificado como posible objeto de nuevas investigaciones. Entre ellos destaca la incorporación al sistema de un módulo de evaluación de escenarios, lo cual agilizaría la retroalimentación del proceso y proporcionaría una mejora progresiva de las alternativas de uso del suelo generadas. Otros aspectos de interés serían la vinculación del sistema con otros programas de simulación de cultivos, evaluación del impacto ambiental o modelización de la expansión del suelo urbano.

## Bibliografía

- Alshuwaikhat, H. B. & Nassef, K. (1996). A GIS-based Spatial Decision Support System for suitability assessment and land use allocation. *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 21, 4A: 525: 543.
- Banai, R. (1993). Fuzziness in Geographical Information Systems: contributions from the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Geographical Information Systems*. 7, 4: 315: 329.
- Barredo, J. I. (1996). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. Rama, Madrid.
- Carver, S. J. (1991). Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*. 5, 3: 321: 339.
- Cohon, J. L., 1978. Multiobjective Programming and Planning. Academic Press, New York.
- Consellería de Economía. (2000). Estratexía Galega para o Desenvolvemento Rural. (Documento no publicado).
- Croteau, K. G., Faber, B. G. & Vernon, L. T. (1997). SMART PLACES: A tool for design and evaluation of land use scenarios. In: Proceedings of the 1997 ESRI User Conference (CDROM), ref. artículo #121. Environmental Systems Research Institute, San Diego, C. A. Available at: <http://gis.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to150/pap121/p121.htm> [25 May 2006]
- De la Rosa, D., Moreno, J. A., García, L. V. & Almorza, J. (1992). MicroLEIS: A microcomputer-based Mediterranean land evaluation information system. *Soil Use and Management*. 8: 89: 96.
- Densham, P. J. (1991). Spatial Decision Support Systems. In: Maguire, D. J. et al. (Eds.) Geographical Information Systems: Principles and Applications. Logman, London. 403-412.



- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, P. A. K. & Toledano, J. (1995). Raster procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 61, 5: 539: 547.
- Eastman, J. R., Jiang, H. & Toledano, J. (1998). Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS. In: Beinat, E. & Nijkamp, P. (Eds.) *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 227-251.
- FAO. (1976). *Esquema para la Evaluación de Tierras*. FAO, Rome.
- FAO. (1993). *Guidelines for Land-Use Planning*. FAO Development Series. FAO, Rome.
- Fischer, G., Makowski, M. & Granat, J. (1998). AEZWIN. An Interactive Multiple-Criteria Analysis Tool for Land Resources Appraisal. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. Available at: <http://www.iiasa.ac.at/Publications/Documents/IR-98-051.pdf> [25 May 2006]
- Geertman, S. & Stillwell, J. (2003). Planning Support Systems: An Introduction. In: Geertman, S. & Stillwell, J. (Eds.) *Planning Support Systems in Practice*. Springer-Verlag, Berlin. 3-22.
- Goicoechea, A., Hansen, D. R. & Duckstein, L. (1982). *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. John Wiley & Sons, United States.
- Gómez Orea, D. (1994). *Ordenación del Territorio. Una Aproximación desde el Medio Físico*. Editorial Agrícola Española, Madrid.
- INE (2002). *Censo Agrario 1999*. INE, Madrid, Spain.
- Klosterman, R. E. (2001). The Whatif? Planning Support System. In: Brail, R. K. & Klosterman, R. E. (Eds.) *Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems, Models, and Visualization Tools*. ESRI Press, Redlands, CA. 263-284.
- Kwartler, M. & Bernard, R. N. (2001). CommunityViz: An integrated Planning Support System. In: Brail, R. K. & Klosterman, R. E. (Eds.) *Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems, Models, and Visualization Tools*. ESRI Press, Redlands, CA. 285-308.
- Lu, C. H., Van Ittersum, M. K. & Rabbinge, R. (2004). A scenario exploration of strategic land use options for the Loess Plateau in northern China. *Agricultural Systems*. 79: 145: 170.
- Malczewski, J. & Ogryczak, W. (1995). The multiple criteria location problem: 1. A generalized network model and the set of efficient solutions. *Environment and Planning A*. 27: 1931: 1960.
- Matthews, K. B., Craw, S. & Sibbald, A. R. (1999). Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating GIS and environmental models with search and optimisation algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 23: 9: 26.
- Mendoza, G. A. (1997). A GIS-based multicriteria approaches to land use suitability assessment and allocation. In: *Seventh Symposium on Systems Analysis in Forest Resources*. USDA Forest Service, Traverse City, USA. Available at: <http://www.ncrs.fs.fed.us/pubs/gtr/other/gtr-nc205/landuse.htm> [25 May 2006]
- Pease, J. R. (1990). Land use designation in rural areas: an Oregon case study. *Journal of Soil and Water Conservation*. 45, 5: 524: 528.
- Roetter, R. P., Hoanh, C. T., Laborte, A. G., Van Keulen, H., Van Ittersum, M. K., Dreiser, C., Van Diepen, C. A., De Ridder, N. y Van Laar, H. H. (2005). Integration of Systems Network (SysNet) tools for regional land use scenario analysis in Asia. *Environmental Modelling & Software*. 20, 3: 291: 307.
- Rossiter, D. G. (1990). ALES: A framework for land evaluation using a microcomputer. *Soil Use and Management*. 6, 1: 7: 20.
- Santé, I. & Crecente, R. (2005). Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales. *GeoFocus*. 5: 40: 68.
- SDC-Xunta de Galicia. (2003). *Mapa de Coberturas e Usos do Solo de Galicia*. CD-ROM. Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal, Santiago de Compostela, Spain.
- Siskos, Y., Despotis, D. K. & Ghediri, M. (1994). Multiobjective modelling for regional agricultural planning: Case study in Tunisia. *European Journal of Operational Research*. 77: 375: 391.
- Spinney, J. (1999). *An Integrated Approach to Land Use Planning: An Illustration in the French River Watershed*. Tesis doctoral. Daltech, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia.
- Van Ittersum, M. K. (1995). *Description and User Guide of GOAL-QUASI: an IMGLP Model for the Exploration of Future Land Use*. DLO-Research Institute for Agrobiological and Soil Fertilization, Wageningen.
- Van Lier, H. N. (1998). The role of land use planning in sustainable rural systems. *Landscape and Urban Planning*. 41: 83: 91.
- Verheye, W. H. (1997). Land use planning and national soils policies. *Agricultural Systems*. 53: 161: 174.
- Watson, P. M. & Wadsworth, R. A. (1996). A computerised decision support system for rural policy formulation. *International Journal of Geographical Information Systems*. 10, 4: 425: 440.
- Weerakon, K. G. P. K. (2002). Integration of GIS based suitability analysis and multicriteria evaluation for urban land use planning; contribution from the Analytic Hierarchy Process. In: *3rd Asian Conference on Remote Sensing*. Asian Association on Remote Sensing, Nepal.
- Xiang, W. N. & Clarke, K. C. (2003). The use of scenarios in land-use planning. *Environment & Planning B: Planning and Design*. 30: 885: 909.