

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CÓMPUTO PARA DETERMINAR APTITUD ECOTURÍSTICA DE ÁREAS FORESTALES**DESIGN OF A COMPUTER SYSTEM TO DETERMINE ECOTOURISM SUITABILITY OF FOREST AREAS**

**Marcelino A. Pérez-Vivar¹; Manuel de J. González-Guillén;
J. René Valdez-Lazalde; Héctor M. de los Santos-Posadas;
Gregorio Ángeles-Pérez**

Posgrado Forestal, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. km 36.5 Carretera México-
Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Correo-e: marcelpv@colpos.mx (Autor para correspondencia).

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue diseñar y construir un sistema de cómputo (software) con la finalidad de generar mapas de aptitud ecoturística. Para ello, se estructuró un modelo conceptual que combina herramientas de evaluación multicriterio y SIG en un ambiente de toma de decisiones. El diseño del software se realizó de acuerdo con el modelo conceptual y, finalmente, el diseño fue codificado en lenguaje de programación Visual Basic®. Como información de entrada, el sistema utiliza criterios e indicadores (cartografiados) para el desarrollo adecuado de alguna actividad ecoturística de interés, así como mapas temáticos correspondientes. La información de salida son mapas en formato raster cuyas celdas presentan valores en un gradiente de 0 a 1 representando la aptitud de dicha celda para el desarrollo de la actividad ecoturística evaluada. Este sistema puede ser una herramienta muy valiosa, eficaz y eficiente en el proceso de toma de decisiones y planificación del uso de la tierra.

PALABRAS CLAVE: Software, SIG, aptitud, evaluación multicriterio, ecoturismo.

ABSTRACT

The aim of this study was to design and develop a computer system (software) capable of generating ecotourism suitability maps. Therefore, a conceptual model was structured combining GIS and multicriteria evaluation tools in a decision-making environment. The software design was performed according to the conceptual model and, lastly, the design was coded in the programming language Visual Basic®. As input values, the system uses criteria and indicators (mappable) for the proper development of any ecotourism interest and corresponding thematic maps. The output information is the raster map whose cells have gradient values ranging from 0 to 1, which represents the cell's ability to develop the evaluated ecotourism activity. This system can be a valuable, effective and efficient tool in the decision-making process and land use planning.

KEYWORDS: Software, GIS, suitability, multiple criteria evaluation, ecotourism.



Recibido: 16 de noviembre de 2011
Aceptado: 17 de octubre de 2012
doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.11.083
<http://www.chapingo.mx/revistas>

INTRODUCCIÓN

El turismo como actividad recreativa ha crecido vertiginosamente trayendo consigo repercusiones o impactos negativos en los componentes biofísicos, socioeconómicos y ambientales de los diversos ecosistemas en que se desarrolla (Kimmel, 1999). Ante tal situación, han surgido alternativas como el ecoturismo que busca establecer una relación benéfica entre sociedad-naturaleza-comunidad local (Wunder, 1999). En esta relación, la naturaleza brinda servicios de recreación a la sociedad, generando beneficios a las comunidades locales, las cuales se ven motivadas por la conservación de la naturaleza, estableciéndose un círculo virtuoso que perdura en el tiempo (Ceballos-Lascuráin, 1998).

Una planificación ambiental adecuada debe establecer los usos más apropiados para cada área o punto de un territorio en función de las características físicas y biológicas del espacio (Luque-Gil, 2003). Para ello, un concepto central es el de "aptitud", que es una medida del grado en el cual las cualidades de una unidad de suelo satisfacen los requerimientos de una forma particular de uso. La correspondencia cualidades-requerimientos determina la habilidad de un tipo de suelo para soportar un uso determinado (Gómez-Orea, 2007). La evaluación de la aptitud potencial del suelo es un paso importante para detectar los límites ambientales dentro de la planeación sustentable (Bandyopadhyay et al., 2009), dado que permite guiar las decisiones sobre la utilización del mismo para un uso óptimo de los recursos. Por otra parte, el proceso de clasificación de aptitud es la evaluación y agrupación de áreas específicas de suelo en términos de su aptitud para un uso definido. Por lo general, el resultado de la evaluación es un mapa que describe la aptitud de un área para un uso particular de interés, en donde es posible ubicar los espacios en alguna escala de aptitud; por ejemplo, apto sin limitaciones, apto con algún tipo de limitación o no apto (Van-Lanen et al., 1992).

Existen algunas herramientas o métodos utilizados en la evaluación de aptitud de la tierra. Entre éstos figura la "Evaluación del uso de la tierra", dirigida a la evaluación de los recursos naturales y la regulación de actividades humanas en un espacio (Bojórquez-Tapia et al., 1999). El propósito de esta evaluación es identificar la capacidad de una unidad de tierra para alojar un uso con base en requerimientos específicos (tipo de suelo, precipitación, temperatura, otros) (Bustillos-Herrera et al., 2007). Otra herramienta es la "Evaluación multicriterio" (EMC), la cual comprende una serie de técnicas enmarcadas en el campo de la teoría de la decisión. El objetivo de la EMC es asistir a los centros de decisión en la elección de la mejor de una serie de alternativas bajo la presencia de múltiples criterios, así como de diversa prioridad, para alcanzar un objetivo (Elaalem et al., 1999). Por otra parte, los "Sistemas de Cómputo Geográfica" (SIG) ofrecen capacidades de automatización, almacenamiento, procesamiento, manejo, despliegue y análisis de datos espaciales para el análisis geográfico (Ceballos-Silva et al., 1995). La EMC y los SIG han sido combinados para la evaluación

INTRODUCTION

Tourism as a recreational activity has grown rapidly bringing negative impacts on the biophysical, socioeconomical and environmental components of the various ecosystems in which it develops (Kimmel, 1999). Given this situation, some alternatives have emerged such as ecotourism that seeks to establish a beneficial relationship between society-nature-local communities (Wunder, 1999). In this relationship, nature provides recreation services to society, bringing benefits to local communities which are motivated by the nature conservation, establishing a virtuous cycle that lasts over time (Ceballos-Lascuráin, 1998).

A proper environmental planning must set the most appropriate uses for each area or territory point, based on the physical and biological space characteristics (Luque-Gil, 2003). Thus, "suitability" is a central concept which is a degree measure to which the qualities of a soil unit satisfy the requirements of a particular use. Qualities-requirements correspondence determines a soil type ability to support a particular use (Gómez-Orea, 2007). Assessing the potential soil suitability is an important step to detect the environmental limits within sustainable planning (Bandyopadhyay et al., 2009), because it helps guiding decisions about its use for optimal resources use. Furthermore, the suitability classification process is the evaluation and grouping of specific land areas in terms of their suitability for a defined use. Usually, the evaluation result is a map that describes the ability of an area for a particular application of interest, where it is possible to locate any spaces in aptitude scale, for example, suitable without limitation, suitable with some limitation or no suitable (Van-Lanen et al., 1992).

There are some tools or methods used in the land suitability evaluation. Among them are the "land use evaluation", aimed to evaluate the natural resources and human activities in a space regulation (Bojórquez-Tapia et al., 1999). The purpose of this evaluation is to identify a unit's ability to accommodate a use based on specific requirements (soil type, rainfall, temperature, etc.) (Bustillos-Herrera et al., 2007). Another tool is the "multi-criteria evaluation" (MCE), which comprises a number of techniques framed in the field of decision theory. The aim is to assist decision-making centers in choosing the best of a number of alternatives under the presence of multiple criteria, as well as different priority, to achieve an objective (Elaalem et al., 1999). Also, the "Geographical computer systems" (GIS) provide automation, storage, processing, handling, display and spatial data analysis capabilities for geographical analysis (Ceballos-Silva et al., 1995). MCE and GIS have been combined to evaluate a number of alternatives conditioned by different criteria for choosing the best solution to problems with regards to land use (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2003). Therefore, this combination becomes a powerful tool that facilitates environmental planning for optimal site analysis of the specific activi-

de un número de alternativas condicionadas por diferentes criterios para la elección de la mejor solución a problemas con respecto al uso de la tierra (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2003). Por tanto, esta combinación se convierte en una herramienta poderosa que facilita la planificación ambiental para el análisis del emplazamiento óptimo de las actividades específicas (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2003; Fung & Wong, 2007; Ocaña-Ocaña & Galacho-Jiménez, 2002). En ecoturismo, la EMC y el SIG se han utilizado para conformar metodologías basadas en la medición de variables y procesos estadísticos para su análisis que permiten caracterizar actividades ecoturísticas de interés a través de ciertos criterios. Estos criterios pueden ser naturales, económicos y sociales e indicadores asociados, tales como topografía, vegetación, hidrografía, geología, infraestructura, para generar valores de aptitud con fines comparativos (Pérez-Vivar et al., 2012).

Con base en lo anterior, es de vital importancia que la planificación de una iniciativa de ecoturismo se desarrolle de acuerdo con las aptitudes y capacidades de un ecosistema para albergar cierto tipo de actividad ecoturística (López-Hernández & Treviño-Pérez, 2004). Este proceso de toma de decisiones requiere de herramientas tanto metodológicas como tecnológicas que permitan contrastar los requerimientos biofísicos, socioeconómicos y ambientales (cartografiables), para el desarrollo adecuado de actividades ecoturísticas con las características de aptitud física del espacio, con el fin de evaluar su compatibilidad.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue diseñar y construir un sistema de información (software) con base en un modelo conceptual que combina herramientas de evaluación multicriterio y SIG con la finalidad de generar mapas con valores de aptitud ecoturística.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño y la construcción del sistema de cómputo (software) se desarrolló en cuatro fases principales (Figura 1), las cuales se describen a continuación:

Diseño del modelo conceptual

Esta fase consiste en la combinación del Proceso Jerárquico Analítico (PJA) (técnica EMC) y del SIG, para generar secuencias ordenadas de pasos que conforman entidades destinadas a la entrada de datos, procesamiento de éstos y generación de resultados (valores de aptitud) como producto principal.

Diseño del sistema de información

Esta fase se encarga de prever las partes que conformarán el sistema para alojar cada elemento del modelo, así como la interacción que habrá entre ellas. El sistema está conformado por los subsistemas de entrada y salida de datos, almacenamiento y procesamiento.

ties (Ceballos-Silva & López-Blanco, 2003; Fung & Wong, 2007; Ocaña-Ocaña & Galacho-Jiménez, 2002). In ecotourism, MCE and GIS have been used to shape methodologies based on variables measurement and statistical processes that characterize ecotourism activities through certain criteria. These criteria can be natural, economical and social or related indicators, such as topography, vegetation, hydrography, geology, infrastructure or ability to generate suitability values for comparison purposes (Pérez-Vivar et al., 2012).

Based on this, it is vital that planning of an ecotourism initiative develops according with all the ecosystem abilities and capabilities to accommodate certain ecotourism activities (López-Hernández & Treviño-Pérez, 2004). This decision-making process requires both methodological and technological tools that allow comparing the biophysical, socioeconomical and environmental (mappable) requirements, for the proper ecotourism activities development with space suitability characteristics and with the aim to assess their compatibility.

In this context, the aim of this work was to design and build an information system (software) based on a conceptual model that combines multicriteria evaluation tools and GIS in order to generate maps with ecotourism suitability values.

MATERIALS AND METHODS

The computer system (software) design and construction was developed in four main phases (Figure 1), which are described below:

Conceptual model design

This phase consists of the combination of the Analytical Hierarchy Process (AHP) (MCE technique) and GIS to generate ordered steps sequence that comprise entities intended for data entry, processing and results generation (suitability values) as main product.

Information system design

This phase is responsible for providing the parts that will make the system up to accommodate each model element and their interaction. The system consists of input and output data subsystems, storage and processing.

Computer system construction

This phase consists of generating software code modules to create each system element, providing its functionality and implementing the interactions between them so that functionality provided in the conceptual model can be replicated.

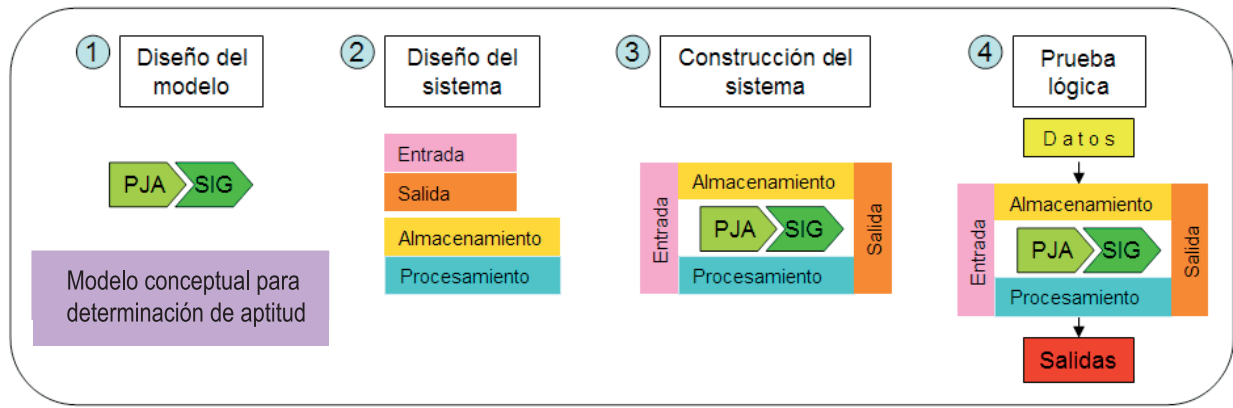


FIGURA 1. Fases que integran la creación del sistema de cómputo (software). PJA: Proceso Jerárquico Analítico. SIG: Sistema de Información Geográfica.

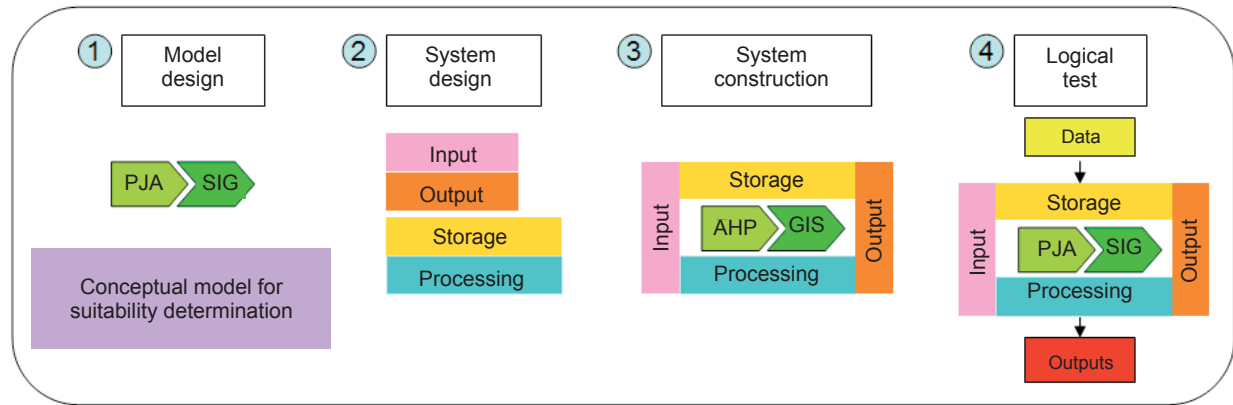


FIGURE 1. Creation of computer system (software) stages. AHP: Analytical Hierarchy Process. GIS: Geographic Information System

Construcción del sistema de cómputo

Esta fase consiste en la generación de módulos de código de software para crear cada elemento del sistema, proveer su funcionalidad e implementar las interacciones entre ellos de manera que pueda replicar la funcionalidad prevista en el modelo conceptual.

Prueba de la lógica de operación

Esta fase tiene la finalidad de verificar la estructura lógica de operación del sistema. Es necesario aclarar que en esta etapa sólo se comprueba el funcionamiento del sistema a través de una ejecución del proceso de evaluación de aptitud con datos de prueba. Una validación como tal escapa a los alcances del presente documento y será realizada y reportada en un trabajo posterior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo conceptual para determinar la aptitud

En la Figura 2 se puede observar que el modelo está compuesto de tres secciones primordiales: datos de entrada, procesamiento y datos de salida.

Logical operation test

This phase is intended to verify the system’s operation logical structure. It is important to mention that, at this stage only the system operation through a suitability evaluation process with test data can be done. A validation as such is beyond the scope of this paper and will be performed and reported in a subsequent paper.

RESULTS AND DISCUSSION

Conceptual model for suitability determination

Figure 2 shows that the model is composed of three primary sections: data input, processing and output data.

a) Input data. Information related to the biophysical, socio-economical and environmental requirements for an ecotourism activity development is entered. The information is expressed as a criteria hierarchy together with its weights. The last hierarchy level corresponds to variables (cartographical) derived from the criteria and expressed as intervals associated to a suitability level (S_1 = higher suitability, ..., S_n = lower suitability). This information is accompanied by its correspondent thematic information (in digital maps form).

a) **Datos de entrada.** Se ingresa la información relacionada con los requerimientos biofísicos, socioeconómicos y ambientales para el desarrollo de una actividad ecoturística. La

b) **Processing.** This section consists of two processes. The first corresponds to the AHP values implementation to generate standardized values of the thematic maps used in the

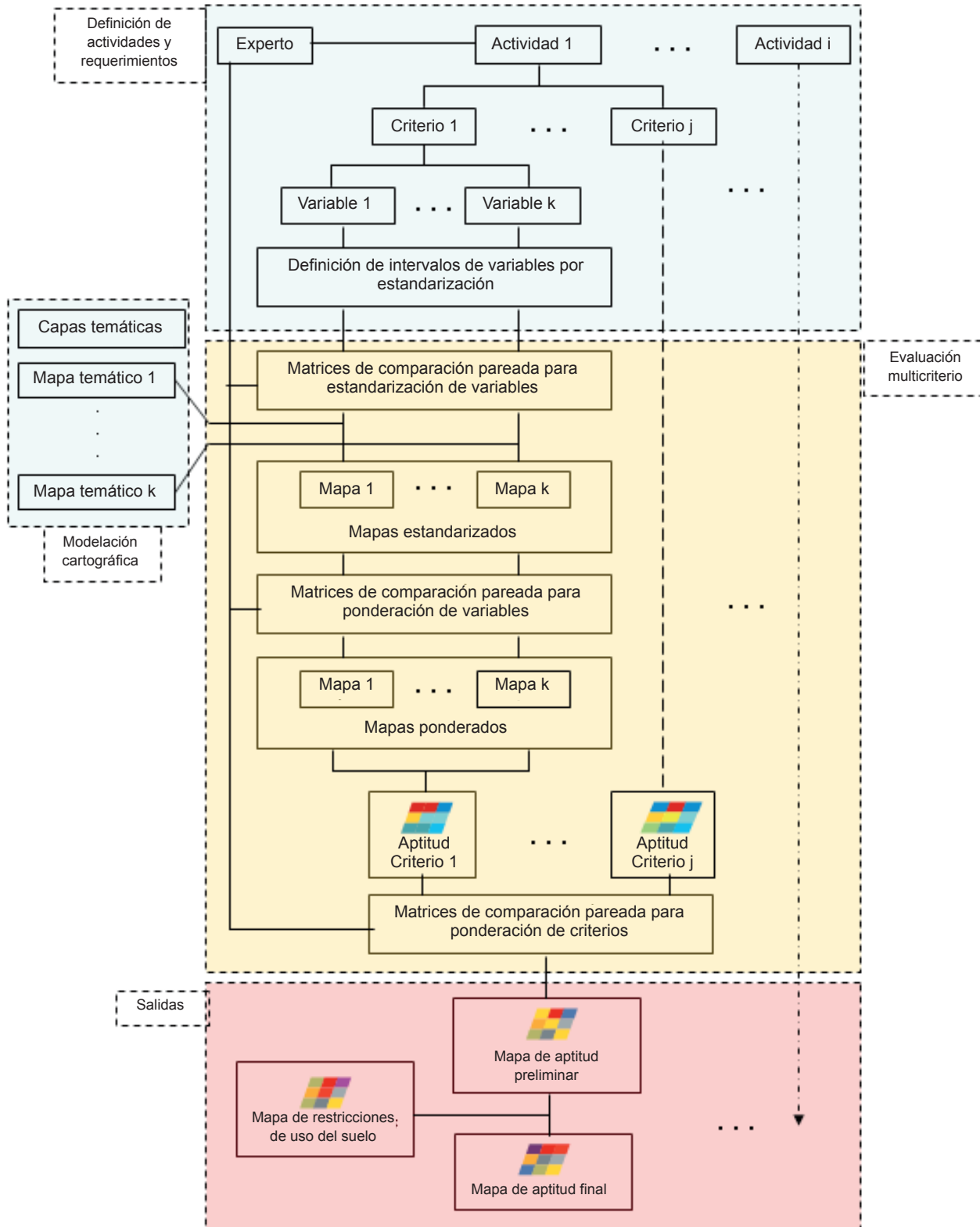


FIGURA 2. Modelo conceptual para la determinación de aptitud con fines ecoturísticos.

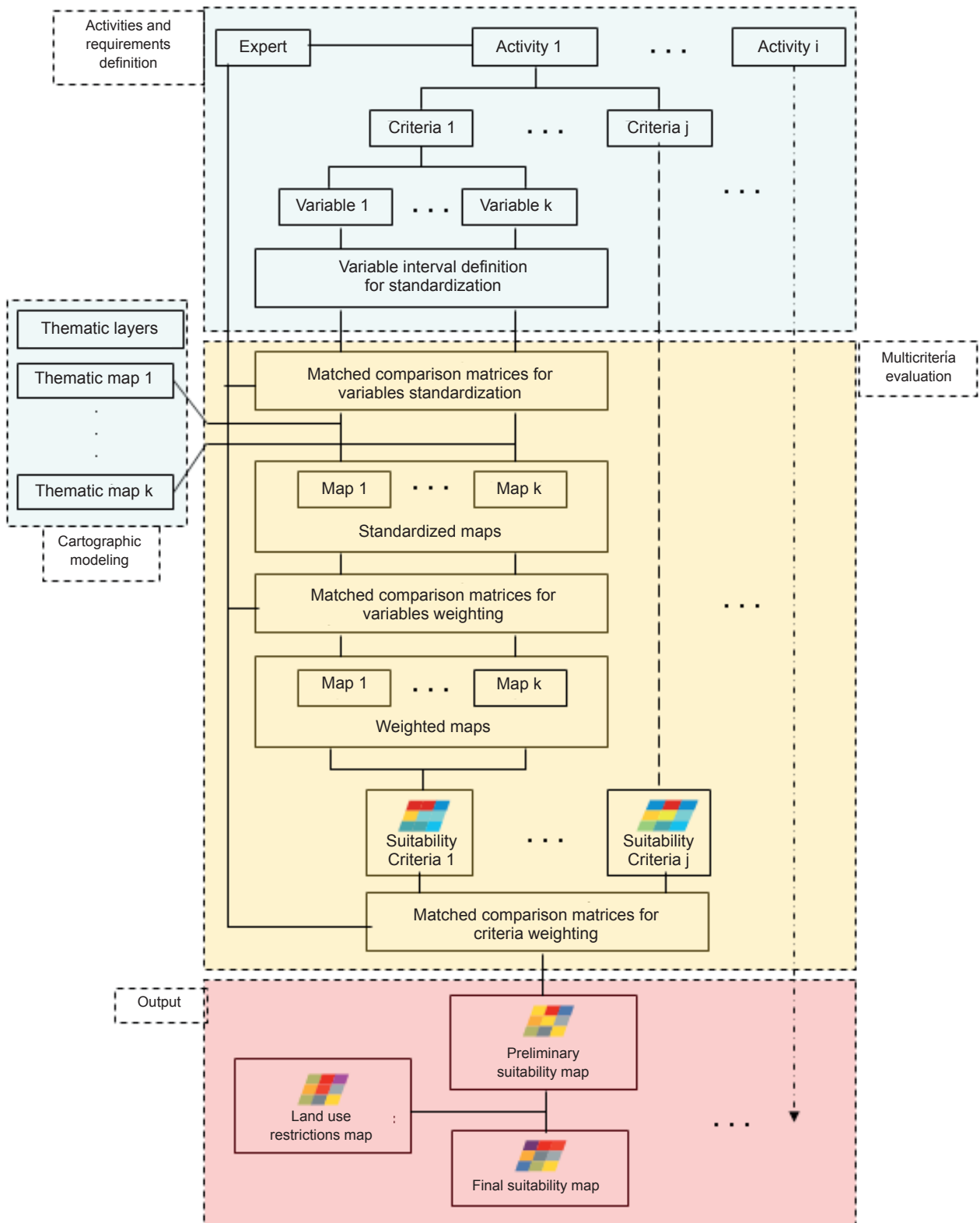


FIGURE 2. Conceptual model for suitability determination with ecotourism purposes

información es expresada como una jerarquía de criterios junto con sus ponderaciones. El último nivel de jerarquía corresponde a las variables (cartográficas) derivadas de los criterios y expresadas como intervalos asociados a un nivel de aptitud (S_1 = mayor aptitud, ..., S_n = menor aptitud). Di-

modeling (Barredo-Cano & Gómez-Delgado, 2006), and to the weights generation for the criteria hierarchy. Both types of values are obtained by the paired comparisons technique using the AHP fundamental scale values (Saaty, 1980) (Table 1). For standardization, matrix structure takes the form of

cha información va acompañada de la información temática (en forma de mapas digitales) correspondiente.

b) Procesamiento. Esta sección consta de dos procesos. El primero corresponde a la implementación del PJA para generar valores estandarizados de los mapas temáticos usados en la modelación (Barredo-Cano & Gómez-Delgado, 2006), y a la generación de valores de ponderación para la jerarquía de criterios. Ambos tipos de valores son obtenidos mediante la técnica de comparaciones pareadas utilizando los valores de la escala fundamental del PJA (Saaty, 1980) (Cuadro 1). Para la estandarización, la estructura de la matriz toma la forma del Cuadro 2; para la ponderación, la matriz se modifica colocando en los rótulos (por ejemplo, filas y columnas) el nombre de los criterios o variables en los que se determina el valor de ponderación.

Table 2; for the weighting, the matrix is modified by placing on labels (e.g. rows and columns) the criteria name or variables in determining the weighting value.

Matrices results allow obtaining the principal eigenvector (Elineema, 2002), which establishes the standardized values for each mapping variable or criteria weighting value, as applicable. The matrices consistency is reviewed with the Consistency Index (CI) through the maximum eigenvalue (λ_{max}) that provides a quantitative measurement of the judgments consistency between criteria/variables pairs (Saaty, 1980):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Where n is the number of variables or criteria used in the comparison matrix.

CUADRO 1. Escala fundamental del Proceso Analítico Jerarquizado (Saaty, 1980).

| *Intensidad de importancia | Definición | Explicación |
|----------------------------|--|---|
| 1 | Igual importancia | Las dos actividades contribuyen de igual manera al objetivo. |
| 3 | Importancia moderada | La experiencia y el juicio moderadamente a favor de una actividad sobre la otra. |
| 5 | Importancia fuerte | La experiencia y el juicio fuertemente a favor de una actividad sobre la otra. |
| 7 | Importancia muy fuerte o importancia demostrada | Una actividad es fuertemente favorecida sobre la otra. |
| 9 | Extrema importancia | La evidencia favorece una actividad sobre la otra en el orden de afirmación más alto posible. |
| Recíprocos | Si se asigna a_{ij} al comparar la actividad i con la j , entonces se asigna $a_{ji} = 1/a_{ij}$ al comparar la j con la i . | |

*La escala considera valores enteros intermedios (2, 4, 6, 8), los cuales se omiten con fines de simplicidad.

TABLE 1. Fundamental scale of the Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1980)

| Importance level* | Definition | Explanation |
|-------------------|---|---|
| 1 | Equally important | Both activities contribute equally to reach the target. |
| 3 | Moderate importance | Experience and judgment moderately favor one activity over another. |
| 5 | High Importance | Experience and judgment strongly favor one activity over another |
| 7 | Very high Importance or demonstrated importance | An activity is strongly favored over the other one. |
| 9 | Extreme importance | The evidence favors one activity over another in the highest possible affirmation level |
| Reciprocal | If a_{ij} is assigned when comparing the activity i to j , then $a_{ji} = 1/a_{ij}$ is assigned when comparing j with i . | |

* The scale considers intermediate integer values (2, 4, 6, 8), which are omitted for simplicity purposes.

CUADRO 2. Estructura de la matriz de comparaciones pareadas para la obtención de valores de estandarización.

| Nivel de aptitud | S_1 | S_2 | S_3 | ... | S_n | Valor de estandarización |
|------------------|------------|------------|------------|-----|----------|--------------------------|
| S_1 | 1 | A_{12} | A_{13} | ... | A_{1N} | E_1 |
| S_2 | $1/A_{12}$ | 1 | A_{23} | ... | A_{2N} | E_2 |
| S_3 | $1/A_{13}$ | $1/A_{23}$ | 1 | ... | A_{3N} | E_3 |
| . | . | . | . | 1 | . | . |
| S_N | $1/A_{1N}$ | $1/A_{2N}$ | $1/A_{3N}$ | ... | 1 | E_N |

N = Número de niveles. A_{ij} = Valor de la escala fundamental del proceso jerárquico analítico.

E_i = Eigenvalores para estandarización de mapas temáticos.

TABLE 2. Paired comparisons matrix structure for obtaining standardization values

| Suitability level | S_1 | S_2 | S_3 | ... | S_n | Standardization value |
|-------------------|------------|------------|------------|-----|----------|-----------------------|
| S_1 | 1 | A_{12} | A_{13} | ... | A_{1N} | E_1 |
| S_2 | $1/A_{12}$ | 1 | A_{23} | ... | A_{2N} | E_2 |
| S_3 | $1/A_{13}$ | $1/A_{23}$ | 1 | ... | A_{3N} | E_3 |
| . | . | . | . | 1 | . | . |
| S_N | $1/A_{1N}$ | $1/A_{2N}$ | $1/A_{3N}$ | ... | 1 | E_N |

N = Number of levels. A_{ij} = Fundamental scale of the analytical hierarchy process value.

E_i = Eigenvalues for thematic maps standardization.

La solución de las matrices permite la obtención del eigen-vector principal (Elineema, 2002), que establece los valores estandarizados de cada variable cartográfica o el valor de ponderación de los criterios, según el caso. La consistencia de las matrices es revisada con el índice de consistencia (IC) a través del eigenvalor máximo ($\lambda_{m\acute{a}x}$) que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor, entre pares de criterios/variables (Saaty, 1980):

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Donde, n es el número de variables o criterios empleados en la matriz de comparación.

El valor definitivo a observar es la Razón de Consistencia (RC), que es el cociente del valor IC y el Índice Aleatorio (IA) (Cuadro 3); es decir:

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde, $RC < 0.10$ indica consistencia aceptable en la matriz y $RC \geq 0.10$ indica juicios inconsistentes, debiéndose recon-

The final value to note is the Consistency Ratio (CR), which is the ratio of the CI and the Random Index (RI) (Table 3); that is:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Where $CR < 0.10$ indicates acceptable consistency in the matrix and $RC \geq 0.10$ indicates inconsistent trials, therefore, comparison matrix values must be reconsidered and its resolution too (Malczewski, 1999).

The second process corresponds to the cartographic modeling (applying a decision rule). This process uses the values generated in the AHP process (previous step) to combine standardized thematic maps and weighted maps of both standardized variables and criteria. Lastly, this process ends with the synthesis of suitability maps at each hierarchical level of the criteria from the lowest to the highest level (preliminary suitability map).

c) Output data. This section uses the preliminary suitability map and in a cartographic modeling final step, it multiplies it with a binary map of land use restrictions to obtain the final

CUADRO 3. Índice Aleatorio (IA) para matrices de orden 1 hasta 15. Oak Ridge National Laboratory (Saaty, 1980).

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| IA | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.89 | 1.11 | 1.25 | 1.35 | 1.40 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.54 | 1.56 | 1.57 | 1.58 |

N = Orden de la matriz, IA = Índice Aleatorio de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de una escala de 1 a 9 con juicios de valores recíprocos y diagonal = 1.

TABLE 3. Random Index (RI) for matrices of order 1to15. Oak Ridge National Laboratory (Saaty, 1980)

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.89 | 1.11 | 1.25 | 1.35 | 1.40 | 1.45 | 1.49 | 1.51 | 1.54 | 1.56 | 1.57 | 1.58 |

N = Order of the matrix, RI = Random Index consistency of reciprocal matrix randomly generated from a scale of 1 to 9 with reciprocal value judgments and diagonal = 1.

siderar los valores de la matriz de comparación y su solución (Malczewski, 1999).

El segundo proceso corresponde a la modelación cartográfica (aplicación de una regla de decisión). Este proceso usa los valores generados en el proceso PJA (paso anterior) para combinar los mapas temáticos estandarizados y los mapas ponderados, tanto de variables estandarizadas como de criterios. Finaliza con la síntesis de mapas de aptitud en cada nivel de la jerarquía de criterios desde su nivel inferior hasta el superior (mapa de aptitud preliminar).

c) **Datos de salida.** Esta sección retoma el mapa de aptitud preliminar y en un paso final de modelación cartográfica, lo multiplica con un mapa binario de restricciones de uso de suelo para obtener el mapa de aptitud final de la actividad ecoturística de interés, el cual es reclasificado para obtener un mapa de calificaciones de aptitud.

Diseño del sistema de cómputo

La Figura 3 ilustra el diseño del sistema, el cual consta de tres elementos principales:

suitability map of the ecotourism activity of interest, which is reclassified to get a map suitability scores.

Computer system design

Figure 3 illustrates the system design, which consists of three main elements:

a) **User interface.** This element integrates the input and output data of the conceptual model. It provides functionality for the user to communicate with the system in order to: 1) feed information to the process, 2) direct the system to perform tasks, and 3) display the resulting information from the process.

b) **Database.** It stores information about variable intervals for the suitability levels definition, criteria structure, variables and criteria weight values and thematic maps, to develop the process. It is also storages all information generated by the process.

c) **Processes.** This element contains the routines corresponding to both AHP processes (for standardized values generation, weighting and matrices consistency verification) and

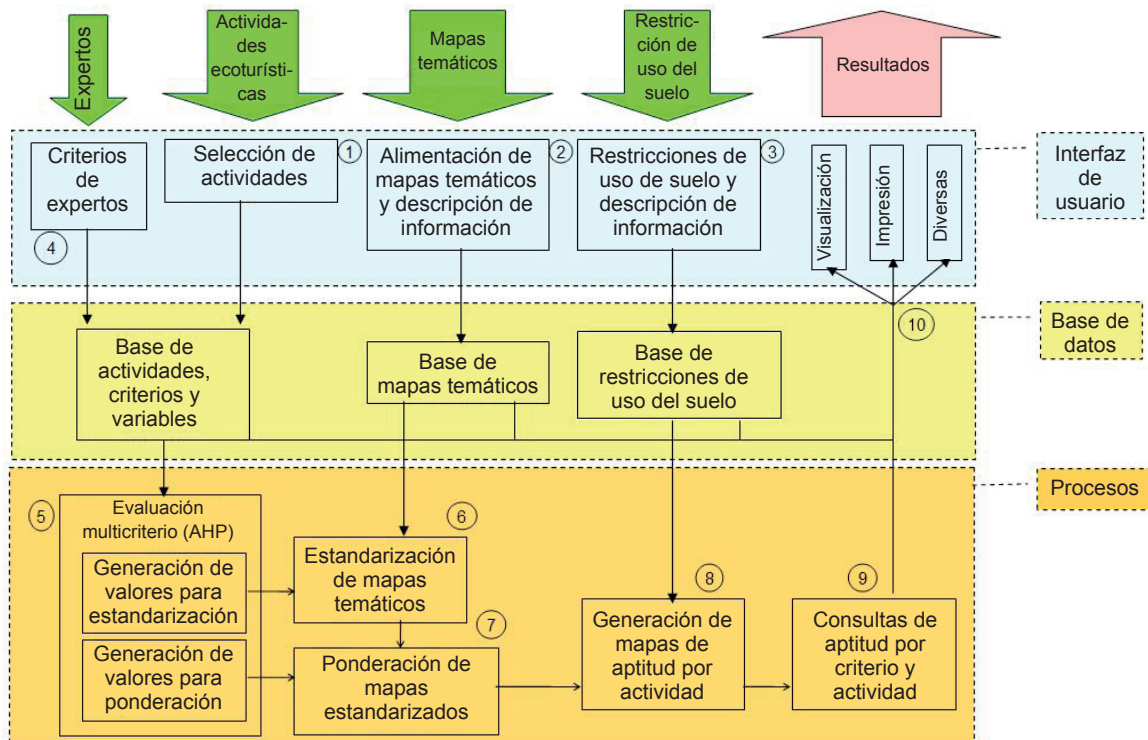


FIGURA 3. Diseño de la aplicación del sistema de cómputo para la determinación de aptitud ecoturística.

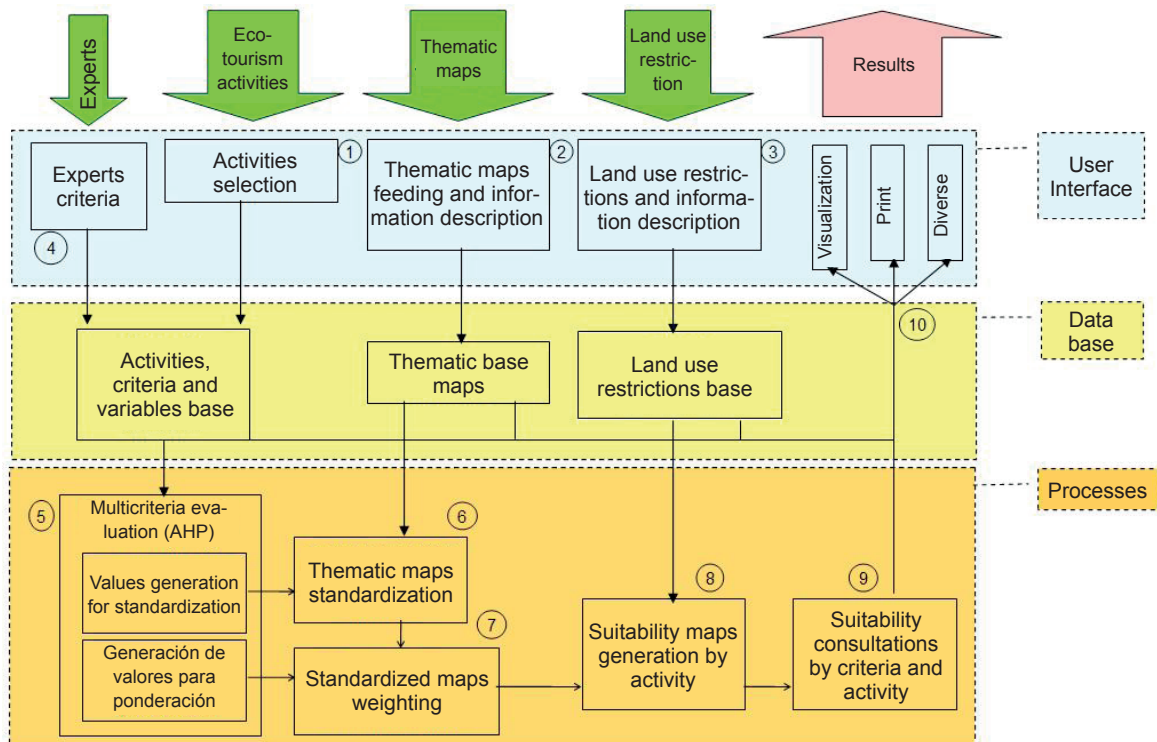


FIGURE 3. Design of the computer system application for suitability ecotourism determination

a) Interfaz de usuario. Este elemento integra las funciones de entrada y salida de datos del modelo conceptual. Provee funcionalidad para que el usuario pueda comunicarse con el sistema a fin de: 1) alimentar la información para el proceso, 2) indicarle al sistema las tareas a realizar, y 3) desplegar la información resultante del proceso.

b) Base de datos. Almacena la información necesaria en cuanto a intervalos de las variables para la definición de niveles de aptitud, estructura de criterios, valores de ponderación para variables y criterios, y mapas temáticos, para desarrollar el proceso. Asimismo, es el lugar de almacenamiento de toda la información generada por el proceso.

c) Procesos. Este elemento alberga las rutinas correspondientes tanto a los procesos del PJA (generación de valores para estandarización, ponderación y verificación de consistencia de matrices) como de modelación cartográfica (estandarización y ponderación de mapas temáticos, síntesis de mapas correspondientes a los niveles de la jerarquía de criterios, generación de mapas de aptitud preliminar y cruzamiento con mapa de restricciones, para la generación de un mapa de aptitud final).

Construcción del sistema de cómputo

En la Figura 4 se presenta el sistema desarrollado en código del lenguaje Visual Basic®. El sistema consta de una pantalla inicial que da acceso a las siguientes opciones: a) edición de actividades para definir el área de trabajo y la actividad para la cual se realiza el proceso; b) mapas temáticos (mediante el explorador de archivos ingresan mapas temáticos al área de

cartográfico modeling (standardization and thematic maps weighting, maps synthesis corresponding to the hierarchical levels of criteria, preliminary suitability maps generation and crossing it with a restrictions map, for the generation of the final suitability map).

Computer system's construction

Figure 4 shows the code system developed in Visual Basic® language. The system shows an initial screen that gives access to the following options: a) activities edition to define the work area and the activity for which the process is carried out; b) thematic maps (using the file browser to enter thematic maps to the corresponding workspace); c) restriction maps (using the file browser to enter restriction maps to the corresponding workspace); d) criteria hierarchy edition, which allows to generate its structure and on each level it defines suitability levels for variables and weight values, also it allows the maps synthesis until obtaining the preliminary suitability map; e) viewer maps, component for viewing with functionality for preliminary suitability map classification in specific suitability levels, and maps crossing with restriction maps to generate the final suitability maps; f) consultations, is the module that allows fed data into the system review, which were used to develop the suitability evaluation process. Details of the use and operation of the system are available on the System's User Manual (Pérez-Vivar et al., 2011).

Test logic operation

This test has the sole purpose of checking the system operating logic; therefore, data are exclusively used to carry out the function test; a validation with real data will be developed in

trabajo correspondiente); c) mapas de restricción (mediante el explorador de archivos ingresan mapas de restricciones al área de trabajo correspondiente); d) edición de la jerarquía de criterios, que permite generar su estructura y sobre cada nivel de ésta, definir niveles de aptitud para variables y valores de ponderación, también permite la síntesis de mapas hasta la obtención del mapa de aptitud preliminar; e) visor de mapas, componente para su visualización con funcionalidad para la clasificación del mapa de aptitud preliminar en clases específicas de aptitud, y cruzamiento de mapas con los de restricciones para la generación de mapas de aptitud final; y f) consultas, módulo que permite la revisión de los datos alimentados al sistema con los cuales se desarrolló el proceso de evaluación de aptitud. Los detalles del uso y operación del sistema pueden consultarse en el Manual de usuario del sistema (Pérez-Vivar et al., 2011).

Prueba de la lógica de operación

Esta prueba tiene la finalidad exclusiva de comprobar la lógica de operación del sistema; por tanto, los datos usados cumplen únicamente con la función de prueba; una validación con

a later work. The system was tested with data for “camping” ecotourism activity in the Sierra Nevada located in the eastern part of the State of Mexico. For this purpose, a suitability model based on the municipal division variables (area), altitude (elevation) intervals and climate types (type) grouped into location and climate criteria (Figure 5a) were defined. Also, data for weighting criteria matrices were defined (Figure 5b) as well as suitability levels for variables standardization matrices (Figure 5c); lastly, the corresponding thematic information was integrated. Once the information is defined, the system: a) creates standardization values and reclassifies thematic maps to obtain standardized maps (Figure 5d); b) generates weight values to create weighted maps, they in turn give rise to criteria maps (Figure 5e); c) creates weight values to generate weighted maps, they give rise to immediate next level map (in this simulation it corresponds to suitability map), which is reclassified to obtain the defined suitability classes map (Figure 5f), and d) crosses the suitability classes with a land use binary restrictions map to obtain the final map.

This paper proposes the creation of a system which defines an evaluation conceptual model that is capable of being ap-

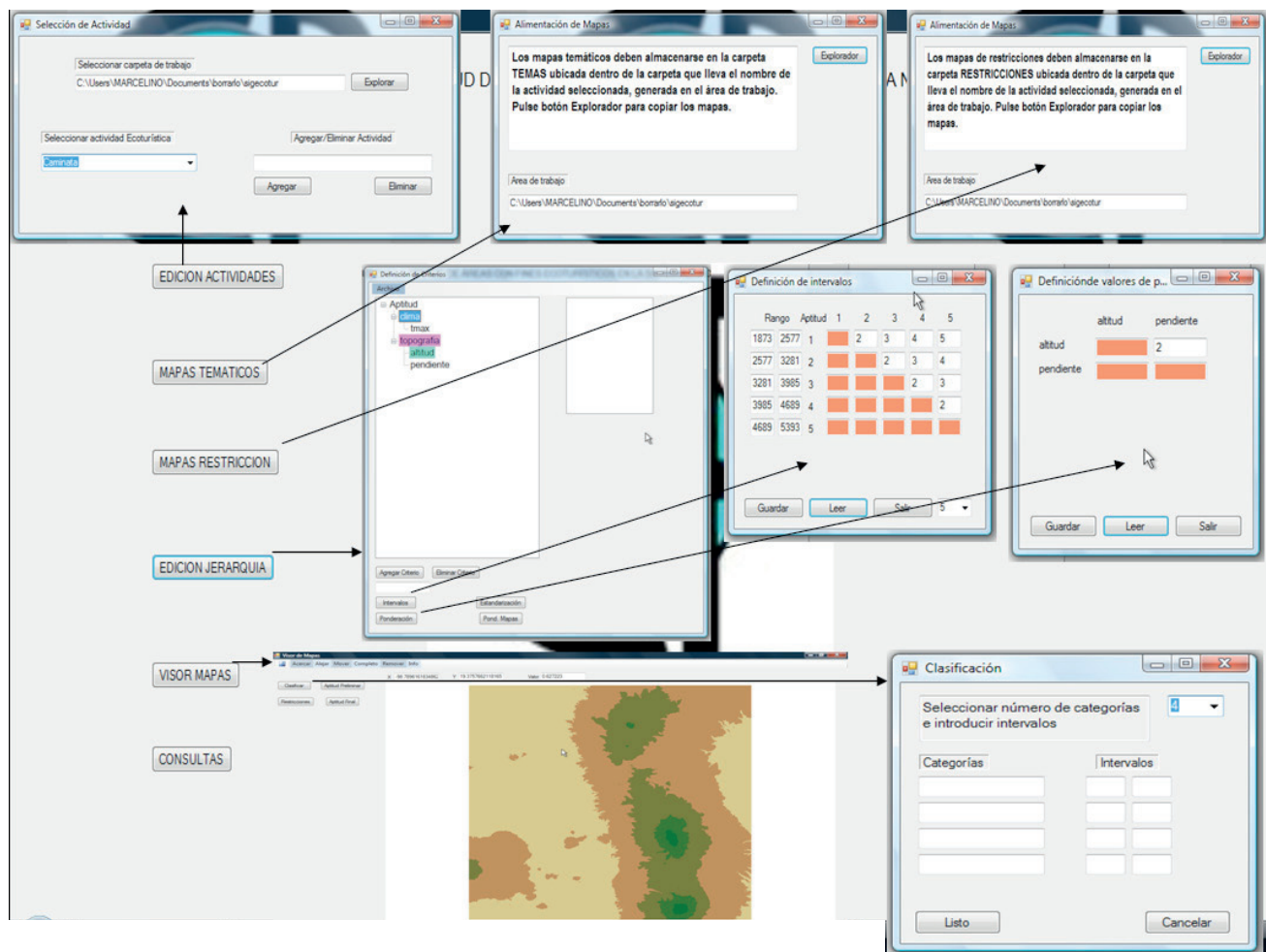
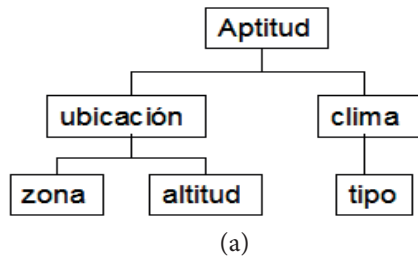


FIGURA 4. Ventanas principales del sistema de cómputo (software) para la determinación de aptitud.
 FIGURE 4. Main windows of the computer system (software) for suitability determination.

datos reales será desarrollada en un trabajo posterior. El sistema se probó con datos para la actividad ecoturística “Campamento” en una zona de la Sierra Nevada en el oriente del Estado de México. Para ello, se definió un modelo de aptitud con base en las variables división municipal (zona), intervalos de altitud (altitud) y tipos de clima (tipo) agrupadas en los criterios ubicación y clima (Figura 5a). También se definieron datos para matrices de ponderación de criterios (Figura 5b) y

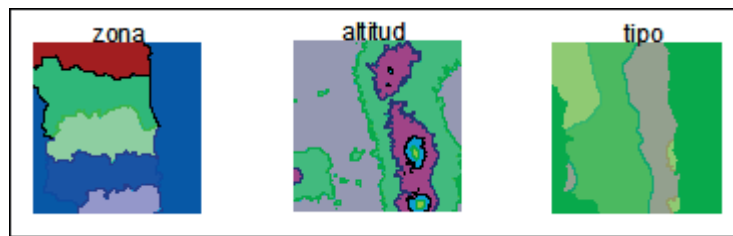
plied to a variety of situations, including the evaluation of different ecotourism activities. There are no similar reports available for comparison purposes, only few of them that pose specific schemes for particular situations. Some literature reports use MCE techniques such as Weighted Linear Combination (WLC) (Franco-Maass et al., 2009), Electre (Kenan, 2006), AHP or Promethee (Blancas-Peral, Guerrero-Casas, & Lozano-Oyola, 2009), and in just one case,



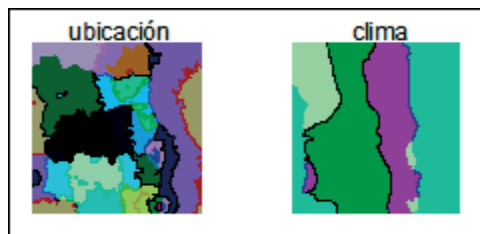
| Matrices para ponderación de criterios | | | | | | | |
|--|-----------|-------|-----------|---------|------|-------|------|
| Aptitud | ubicación | clima | Ubicación | altitud | zona | Clima | Tipo |
| ubicación | 1 | 1/3 | altitud | 1 | 2 | tipo | 1 |
| clima | 3 | 1 | zona | 1/2 | 1 | | |

| Matrices para estandarización de variables | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-------|----|----|----|---|-----|-----|---|
| Altitud | | | | | | | Zona | | | | | | | Tipo | | | | | | | |
| Rango | NA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Rango | NA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Rango | NA | 1 | 2 | 3 | | | |
| 1,873 | 2,577 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 48 | 64 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 8 | 11 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 2,577 | 3,281 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 64 | 80 | 2 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 14 | 2 | 1/2 | 1 | 3 |
| 3,281 | 3,985 | 3 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 80 | 96 | 3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 14 | 17 | 3 | 1/4 | 1/3 | 1 |
| 3,985 | 4,689 | 4 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | 96 | 112 | 4 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | | | | | | |
| 4,689 | 5,393 | 5 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 112 | 128 | 5 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | | | | | | |

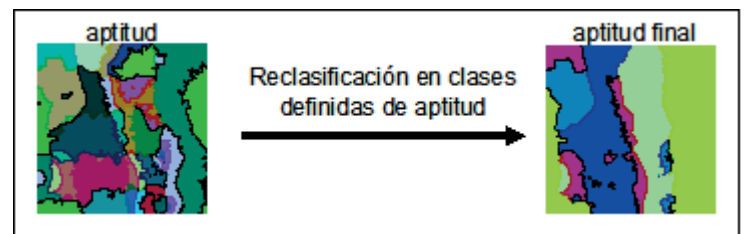
(c) NA: nivel de aptitud



(d)

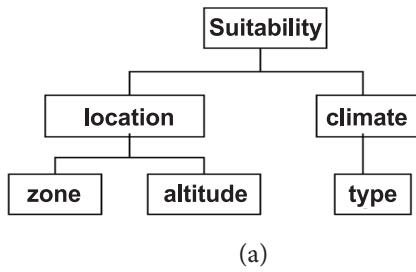


(e)



(f)

FIGURA 5. Fases del proceso de simulación para la prueba de la lógica de operación: a) Modelo de aptitud, (b) Matrices para ponderación de criterios, c) Matrices para estandarización de variables, d) Mapas estandarizados, e) Mapas de criterios, y f) Mapas de aptitud.

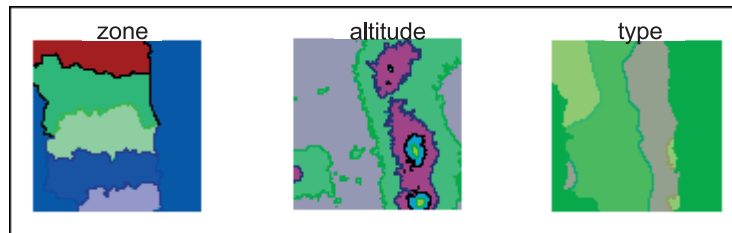


| Matrices for criteria weighting | | | | | | | |
|---------------------------------|----------|---------|----------|----------|------|---------|------|
| Suitability | location | climate | Location | altitude | zone | Climate | type |
| location | 1 | 1/3 | altitude | 1 | 2 | type | 1 |
| climate | 3 | 1 | zone | 1/2 | 1 | | |

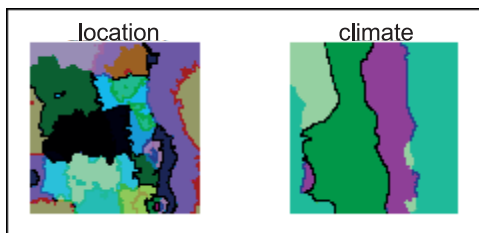
(b)

| Matrices for variables standardization | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---|-----|-----|------|-----|----------|-----|-----|------|-----|-----|-----|----------|----|----|----|---|-----|-----|---|
| Altitude | | | | | Zone | | | | | Type | | | | | | | | | | | |
| Interval | NA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Interval | NA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Interval | NA | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| 1,873 | 2,577 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 48 | 64 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 8 | 11 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 2,577 | 3,281 | 2 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 64 | 80 | 2 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 14 | 2 | 1/2 | 1 | 3 |
| 3,281 | 3,985 | 3 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 80 | 96 | 3 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 14 | 17 | 3 | 1/4 | 1/3 | 1 |
| 3,985 | 4,689 | 4 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | 96 | 112 | 4 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | | | | | | |
| 4,689 | 5,393 | 5 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 112 | 128 | 5 | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | | | | | | |

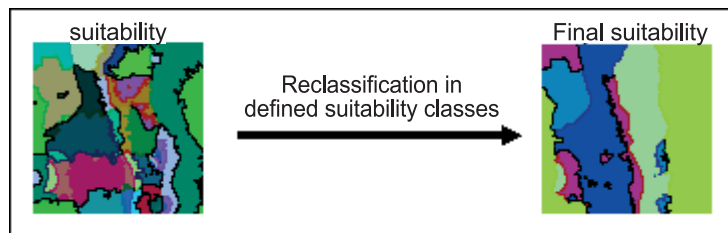
(c) SL: Suitability Level



(d)



(e)



(f)

FIGURE 5. Stages of the simulation process to test the operation logic: a) Suitability model, (b) Matrices for criteria weighting, c) Matrices for variables standardization, d) Standardized maps, e) Criteria Maps, and f) Suitability maps.

niveles de aptitud para matrices de estandarización de variables (Figura 5c); finalmente, se incorporó la información temática correspondiente. Una vez definida la información, el sistema a) crea valores de estandarización y reclasifica mapas temáticos para obtener mapas estandarizados (Figura 5d); b) genera valores de ponderación para crear mapas ponderados, éstos a su vez dan origen a los mapas de criterios (Figura 5e); c) crea valores de ponderación para crear los mapas ponderados; éstos dan origen al mapa del nivel inmediato (en esta simulación corresponde al mapa de aptitud), el cual es reclasificado para obtener el mapa de clases definidas de aptitud (Figura 5f), y d) cruza el mapa de clases de aptitud con un mapa binario de restricciones de uso de suelo para obtener el mapa definitivo.

El presente trabajo plantea la creación de un sistema en el que se define un modelo conceptual de evaluación que es susceptible de ser aplicado a una variedad de situaciones, incluyendo la evaluación de diferentes actividades ecoturísticas. No se dispone de trabajos similares con fines comparativos y los que existen plantean esquemas específicos para situaciones particulares. Un grupo de trabajos hacen uso de alguna técnica de EMC como puede ser la Combinación Lineal Ponderada (CLP) (Franco-Maass et al., 2009), Electre (Kenan, 2006), PJA o Promethee (Blancas-Peral, Guerrero-Casas, & Lozano-Oyola, 2009); y en un caso, combinan CLP con Lógica Borrosa (Marín-Yaseli & Nogués, 2001).

Una coincidencia del sistema con algunos de los trabajos se da en el uso de PJA, en donde por medio de tal técnica se establece una jerarquía de criterios a través de la cual se realiza tanto la comprensión y análisis del problema como su solución. Dicha jerarquía permite además definir la contribución de cada criterio (ponderación de criterios) en la solución del problema. La coincidencia antes mencionada es sólo circunstancial ya que se deriva de la propia técnica, por lo que la forma en cómo se abordan los distintos trabajos difiere de la planteada en nuestro sistema. El enfoque utilizado por el sistema para la determinación de aptitud es el de contrastar las condiciones óptimas para el desarrollo de una actividad ecoturística con aquellas presentes en el medio para emitir un valor de compatibilidad (aptitud); las condiciones deben ser expresadas en forma de capas temáticas. Este enfoque no se da en los trabajos comentados. El sistema utiliza el PJA como un medio para la estandarización y ponderación de variables y criterios, y conecta estos procesos con los de modelación cartográfica del SIG para el procesamiento de mapas; estos procesos están integrados y no funciona uno sin el otro. De los trabajos revisados, sólo uno opera con una mecánica similar (Luque-Gil, 2003), pero no a nivel de detalle como lo sería una actividad ecoturística (en el caso del sistema), sino bajo un enfoque muy general. Por último, el sistema automatiza los procesos que plantea el modelo conceptual, proveyendo un ahorro en esfuerzo y tiempo sustanciales.

Este sistema nació con el interés de evaluar la aptitud ecoturística, pero debido a sus cualidades presenta una potencialidad mucho más amplia que la que aquí se presenta. Los pre-

authors combined WLC with Fuzzy Logic (Marín-Yaseli & Nogués, 2001).

Our system coincidence with some of the previous reports is in the use of the AHP, where by means of such technique, a hierarchy of criteria is established leading to the understanding and analysis of the problem as well as to its solution. This hierarchy also defines each criterion's contribution (criteria weighting) in solving the problem. The coincidence mentioned above, is only circumstantial since it is derived from the technique, so that the way in addressing the various reports differs from that in our system. The approach used by the system for the suitability determination is to contrast the optimal conditions for the development of an ecotourism activity with those present in the environment to issue a compatibility value (suitability); the conditions must be expressed in the form of thematic layers. This approach is not used in the studies mentioned. The system uses AHP as a means for standardizing and variables and criteria weighting, and links these processes with GIS map modeling for map processing; these processes are totally related and one does not work without the other one. From the reviewed literature, there is only one report that operates in a similar way (Luque-Gil, 2003), but not at the level of detail as with an ecotourism activity (in the case of the system) but instead only under a very general approach. Lastly, the system automates the processes designed in the conceptual model, providing substantial time and effort savings.

This system was created because of the need to evaluate ecotourism suitability, but due to its qualities it has a much wider potential than the one presented here. Land has a multifunctional capacity in goods production and services. However, to take advantage of this capability is important to know the suitability for different uses; for example, for biodiversity, water collection, forest plantations, carbon sequestration, among others. In each case, criteria and indicators input may vary, such as biophysical information (types of vegetation, biodiversity, slopes, rivers or water bodies, exhibitions, altitudes, etc.), socioeconomical (roads, infrastructure, population density, poverty indexes, etc.) and environmental (temperature, precipitation, relative humidity, type of weather, etc.). Considering all mentioned above, the system presented in this work, can be a big support tool for decision making processes.

CONCLUSIONS

In this paper, MCE and GIS tools have been combined to create a methodological model that allows spatial units information analysis (for suitability values assignment according to their qualities) in order to accommodate any ecotourism activity. This model was coded in an information system that allows processes automation for suitability maps generation with values between 0 and 1, constituting an important support tool in the ecotourism planning.

dios poseen una capacidad multifuncional en la producción de bienes y servicios. Sin embargo, para poder aprovechar esta capacidad de manera óptima es importante conocer la aptitud para diferentes usos; por ejemplo, para la biodiversidad, captura de agua, plantaciones forestales, captura de carbono, entre otras. En cada caso, podría variar la entrada de criterios e indicadores, tales como información biofísica (tipos de vegetación, biodiversidad, pendientes, ríos o cuerpos de agua, exposiciones, altitudes, otros), socioeconómica (camino, infraestructura, densidad de población, índices de pobreza, otros) y ambiental (temperatura, precipitación, humedad relativa, tipo de clima, otros). Considerando lo anterior, el sistema presentado puede ser una herramienta de gran apoyo para la toma de decisiones.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han combinado herramientas de EMC y SIG para conformar un modelo metodológico que permita el análisis de información de unidades espaciales, para la asignación de valores de aptitud de acuerdo con sus cualidades, con el fin de alojar algún tipo de actividad ecoturística. Este modelo fue codificado en un sistema de información que permite la automatización de procesos para la generación de mapas de aptitud con valores entre 0 y 1, constituyendo una herramienta de apoyo en los procesos de planificación de ecoturismo.

REFERENCIAS

- Bandyopadhyay, S., Jaiswal, R. K., Hegde, V. S., & Jayaraman, V. (2009). Assessment of land suitability potentials for agriculture using a remote sensing and GIS based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 30(4), 879–895. doi: 10.1080/01431160802395235
- Barredo-Cano, J. I., & Gómez-Delgado, M. (2006). *Sistemas de cómputo geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2a ed.). México: Alfaomega.
- Blancas-Peral, F. J., Guerrero-Casas, F. M., & Lozano-Oyola, M. (2009). La localización espacial en la planificación del turismo rural en Andalucía: Un enfoque multicriterio. *Revista de Estudios Regionales*, 48, 83–113. Obtenido de <http://www.revistaestudiosregionales.com/pdfs/pdf1063.pdf>
- Bojórquez-Tapia, L. A., Díaz-Mondragón, S., & Gómez-Priego, P. (1999). GIS-approach for land suitability assessment in developing countries: A case study of forest development project in Mexico. In T. J. Claude (Ed.), *Spatial multicriteria decision making and analysis: A geographic information sciences approach* (pp. 335–353). USA: Ashgate Publishing Company.
- Bustillos-Herrera, J. A., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., & González-Guillén, M. J. (2007). Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): Definición mediante el proceso de análisis jerarquizado y SIG. *Agrociencia*, 41(7), 787–796. Obtenido de <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2007/oct-nov/art-8.pdf>
- Ceballos-Lascuráin, H. (1998). *Ecoturismo: Naturaleza y desarrollo sostenible*. México: Ed. Diana.
- Ceballos-Silva, A., & López-Blanco, J. (2003). Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: A case study in Central Mexico. *Agricultural Systems*, 77, 117–136. doi: 10.1016/S0308-521X(02)00103-8
- Elaalem, L., Comber, A., & Fisher, P. (2010). *Land evaluation techniques comparing fuzzy AHP with TOPSIS methods*. Guimarães, Portugal: 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science.
- Elineema, R. R. (2002). *Análisis del método AHP para la toma de decisiones multicriterio*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Franco-Maass, S., Osorio-García, M., Nava-Bernal, G., & Regil-García, H. H. (2009). Evaluación multicriterio de los recursos turísticos. Parque Nacional Nevado de Toluca, México. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 18, 208–226. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/1807/180714240006.pdf>
- Fung, T., & Wong, F. K. K. (2007). Ecotourism planning using multiple criteria evaluation with GIS. *Geocarto International*, 22(2), 87–105. doi: 10.1080/10106040701207332
- Gómez-Orea, D. (2007). *Ordenación territorial*. España: Mundi-Prensa.
- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decisionmaking methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 9(3), 251–273. doi: 10.1080/02693799508902036
- Kenan, O. (2006). Multiple criteria activity selection for ecotourism planning in Igneada. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 30, 153–164. Obtenido de <http://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/issues/tar-06-30-2/tar-30-2-8-0502-12.pdf>
- Kimmel, J. R. (1999). Ecotourism as environmental learning. *The Journal of Environmental Education*, 30(2), 40–44. doi: 10.1080/00958969909601869
- López-Hernández, N., & Treviño-Pérez, A. (2004). Planificación y gestión sostenible de áreas recreativas en la comunidad Valenciana. *Cuadernos Geográficos*, 34, 163–178. Obtenido de http://www.grupoinvesturismo.ua.es/publicaciones/articulos/0210_5462.pdf
- Luque-Gil, A. M. (2003). La evaluación del medio para la práctica de actividades turístico-deportivas en la naturaleza. *Cuadernos de Turismo*, 12, 131–149. Obtenido de <http://revistas.um.es/turismo/article/view/19111/18471>
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. USA: John Wiley & Sons.
- Marín-Yaseli, M. L., & Nogués, B. D. (2001). La potencialidad turística del medio natural en el Lic de las Sierras Ibéricas Riojanas mediante evaluación multicriterio. *Zubía Monográfico*, 13, 227–240. Obtenido de <http://www.dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1032626.pdf>
- Ocaña-Ocaña, C., & Galacho-Jiménez, F. B. (2002). *Un modelo de aplicación de SIG y Evaluación Multicriterio, al análisis de la capacidad del territorio en relación a funciones turísticas*. España: IV Congreso “Turismo y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones”.
- Pérez-Vivar, M. A., González-Guillén, M. J., & Valdez-Lazalde, J. R. (2012). Métodos para determinar la aptitud ecoturística de áreas forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y*

- del Ambiente*, 18(3). doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.03.022
- Pérez-Vivar, M. A., González-Guillén, M. J., Valdez-Lazalde, J. R., De Los Santos-Posadas, H. M., & Ángeles-Pérez, G. (2011). *Manual de usuario: Diseño de un Sistema de cómputo para determinar la aptitud ecoturística de áreas forestales*. México: Colegio de Postgraduados. 18(3), 383–399.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. USA: McGraw-Hill.
- Van-Lanen, H. A. J., Van-Diepen, C. A., Reinds, G. J., De Koning, G. H. J., Bulens, J. D., & Bregt, A. K. (1992). Physical Land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European Communities. *Agricultural Systems*, 39, 307–328. doi: 10.1016/0308-521x(92)90102-t
- Wunder, S. (1999). *Promoting forest conservation through ecotourism income? A case study from the Ecuadorian Amazon region*. Ecuador: CIFOR.