

# **MODELADO ESPACIAL INTEGRANDO SIG Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN DOS TIPOS DE DATOS ESPACIALES: VECTOR Y RASTER**

POR

**JOSÉ I. BARREDO CANO**

Y

**JOAQUÍN BOSQUE SENDRA**

## *Introducción*

Es notable el desarrollo, en los últimos tiempos, de la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en su entorno han sido llevadas a cabo diversas aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. Como parte de dicho desarrollo se han generado en el campo de los SIG una serie de modelos y estructuras de datos espaciales y distintos tipos de *software*, así como una sucesión de elementos que producen un amplio espectro de posibilidades de aplicación con estos sistemas.

José I. Barredo Cano. Instituto de Ingeniería. Caracas (Venezuela). Actualmente en el Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares.

Joaquín Bosque Sendra. Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares.

---

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

---

En el presente trabajo <sup>1</sup> se persiguen dos metas principales, por una parte la implementación de un modelo de capacidad para la localización de áreas urbanas en la cuenca del lago de Valencia (Venezuela), en la que se han producido una serie de conflictos de uso del suelo. Dicho modelo será desarrollado en dos tipos de datos espaciales diferentes: vectorial y raster, con el fin de evaluar los resultados de ambos, así como los aspectos generales de la obtención de cada uno.

Para el desarrollo de este trabajo utilizaremos la base de datos del Sistema de Información Ambiental de la Cuenca del Lago de Valencia (SIACLAV, desarrollado por el Instituto de Ingeniería, Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y Fundación Polar, Venezuela).

En una primera parte plantearemos una serie de aspectos generales acerca del modelo espacial, posteriormente se sintetiza la situación actual de la cuenca del lago de Valencia, en referencia al uso del suelo. En la tercera y cuarta parte se desarrollan los apartados del cálculo de los modelos y el análisis de los resultados. Concluyendo con una evaluación general de los costes de implementación del modelo de capacidad para la urbanización en los dos tipos de datos: vectorial y raster.

### *Modelado espacial para la localización de actividades*

El modelado espacial puede entenderse como la unión o el «matrimonio» entre métodos basados en modelos y las operaciones de los SIG, con el fin de proveer herramientas adecuadas para asistir a la planificación (Birkin *et al.*, 1987) y otros estudios, de ahí surge la necesidad de integrar ciertas técnicas ajenas a los SIG para poder llevarlo a cabo, en este caso las de EMC. El fin básico de las técnicas de EMC es «investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto» (Voogd, 1983:21). Lo que permite obtener un conjunto de alternativas (jerarquizadas) que representan posibles soluciones para problemas de decisión, en nuestro caso asociadas a datos espaciales.

Para establecer un problema de decisión en el marco de la EMC es

---

<sup>1</sup> Se encuadra dentro del proyecto AMB94-1.017, financiado por la CICYT.

---

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

---

necesario considerar inicialmente los objetivos y criterios que delimitan el problema evaluado. Los objetivos pueden ser múltiples, o bien ser uno solo (simple), como en el caso de este trabajo; en el cual se plantea la localización de una única actividad (uso urbano) sobre un espacio en concreto.

El objetivo planteado requiere la incorporación de varios criterios como base para la toma de una decisión, dicha base puede ser medida y evaluada, es la evidencia sobre la cual se basa una decisión (Eastman *et al.*, 1993:2); así, en el modelado espacial, los criterios se establecen como estratos temáticos de una base de datos de un SIG (coberturas) que participan en el modelo definido, obteniendo así un nuevo estrato en el cual se indica una capacidad específica para cada lugar del territorio evaluado, es decir, obtenemos el modelo de capacidad de acogida.

Los criterios pueden ser de dos tipos: factores y limitantes. Los factores «son criterios que aumentan o disminuyen la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad considerada» (Eastman *et al.*, 1993:2). Por otra parte, los limitantes únicamente impiden la disponibilidad de ciertas zonas para el asentamiento de la actividad evaluada, por lo general se representan en forma de una cobertura binaria (en el presente trabajo entendemos por cobertura binaria aquella en que sólo se representan dos valores: 1 y 0, indicando capacidad o exclusión, respectivamente, para el asentamiento en cada alternativa o entidad espacial).

Existen algunos antecedentes de aplicaciones integrando EMC y SIG (ver Barredo, 1993, 1994, 1995; Barredo y Bosque, 1995; Can, 1993; Carver, 1991; Alegre, 1983; Chuvieco, 1990; Eastman *et al.*, 1993); en estos trabajos las alternativas del problema de decisión están representadas de diversas formas, en nuestro caso concreto, las alternativas de selección estarán representadas por polígonos (en el modelo vectorial) y *pixels* (en el raster), las cuales se evaluarán a través del procedimiento de la sumatoria lineal ponderada, para determinar cuantitativamente la capacidad de acogida para actividades urbanas en el territorio.

El procedimiento de la sumatoria lineal ponderada se expresa por la ecuación siguiente:

$$C = \sum w_i x_i \prod c_j$$

---

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

---

Donde:         $C$  = Capacidad de asentamiento  
                   $w_i$  = Ponderación del factor  $i$   
                   $x_i$  = Valor de la alternativa en el factor  $i$   
                   $c_j$  = Valor de las alternativas del limitante  $j$   
                   $\Pi$  = Producto

Uno de los aspectos más problemáticos de todo el procedimiento es la asignación de valores de capacidad (en este caso ordinales) a las categorías de cada variable ( $x_i$ ) y pesos a los factores ( $w_i$ ), lo que puede ser un aspecto difícil y motivo de controversias, dependiendo del punto de vista que se asuma para establecerlos.

### *Caracterización del área de estudio*

La cuenca del lago de Valencia se ubica en la Cordillera del Caribe, entre los estados Aragua y Carabobo, en la región central de Venezuela (ver figura 1). Dicha cuenca tiene una superficie de unos 3.000 Km<sup>2</sup>, comprendidos en tres zonas fisiográficas: Serranía del Litoral, planicie del lago de Valencia y Serranía del Interior, en sentido norte-sur.

La cuenca se puede entender como un espacio caracterizado simultáneamente por su agricultura intensiva y la clara vocación agrícola de sus tierras, con 46.000 ha. de áreas con alto potencial agrícola, y por un rasgo más sobresaliente y dinámico, su vertiginoso proceso de urbanización e industrialización, que muestra una tendencia ascendente en la actualidad. Aspectos como: la intensificación de la agricultura, los conflictos en los usos agrícolas, residencial e industrial, y la exagerada concentración de población, son consecuencias directas del proceso de urbanización.

El actual proceso de urbanización se traduce en varias consecuencias, entre las cuales está el crecimiento urbano, notable principalmente en zonas adyacentes a espacios urbanos residenciales e industriales, muchas veces en detrimento de suelos agrícolas, lo que conlleva a un negativo proceso de disminución de la superficie cultivada en la cuenca.

Es así como, en la actualidad, la cuenca es un espacio con una marcada dualidad vocacional, ocasionando esto una fuerte competencia por los suelos aptos entre las dos actividades principales que hoy se desarrollan en este espacio.

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

---



**FIGURA 1.**—*Localización nacional de la cuenca del lago de Valencia*

---

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

---

*Modelo de capacidad para el asentamiento urbano en la cuenca del lago de Valencia, descripción general*

Como planteábamos al principio, en este trabajo desarrollamos un modelo genérico de EMC, en dos tipos de datos diferentes: vectorial y raster. Sin embargo, la realización de ambos coincidirá en una serie de aspectos, como el peso de los factores, la valoración de las clases de cada variable y el uso del proceso de la sumatoria lineal ponderada para la obtención del modelo final de capacidad.

*Los factores utilizados en la decisión.*—Para la definición de los factores a evaluar hemos realizado un análisis de estudios en el ámbito de la planificación física y modelado espacial en el entorno de los SIG (ver: Alegre, 1983; Bosque *et al.*, 1991; EGEOGRAN, 1983, Gray de Cedrán, 1991; Lasanta, 1989; Ruiz Pérez, 1990; Turkstra, 1991), lo que ha permitido, junto con las peculiaridades del área de estudio, definir una serie de elementos que influyen en la capacidad para la urbanización en la cuenca del lago de Valencia.

Del grupo de estudios revisados podemos considerar que, indiferentemente del territorio que se esté analizando, la escala de trabajo, e inclusive el tipo de uso que se pretenda evaluar, existen una serie de variables del medio físico que son comunes a la mayoría de los mismos: pendiente, cobertura natural, geomorfología, geología, fisiografía, edafología, usos del suelo y clima (Mc Harg, 1969).

Para el caso específico de la cuenca del lago de Valencia existen una serie de factores que se deben tomar en cuenta para definir áreas susceptibles de ser urbanizadas, estos factores y las variables que los evalúan se presentan en el cuadro I, a partir de dicha tabla podemos establecer los criterios para la obtención del modelo de capacidad.

Además de las variables mencionadas es necesario considerar una serie de limitantes (*constraints*) definidos por: un área de influencia correspondiente a un espacio adyacente al lago de Valencia, donde los suelos (orgánicos y calcáreos) de la planicie lacustrina no ofrecen un buen basamento para instalar estructuras, por lo que se generará con el SIG (PC-ARC/INFO —ESRI, 1992—) un área de influencia alrededor del lago de 1 Km. Otros elementos considerados también limitantes son: los cuerpos de agua y zonas urbanas existentes (indicadas en la cobertura

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

SIACLAV: MAPA BASE) y parques nacionales (contenidos en la cobertura SIACLAV: ABRAE); en todas ellas no se plantea el establecimiento de nuevas áreas urbanas.

**CUADRO I**  
**VARIABLES Y FACTORES CONSIDERADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL**  
**MODELO DE ASENTAMIENTO URBANO**

VARIABLES	FACTORES DEL MEDIO
Litología (Geología)	a.- Capacidad del terreno para soportar edificaciones
Pendiente del terreno	b.- Capacidad del terreno para la urbanización según la topografía
Balance Morfodinámico (Geomorfología)	e.- Susceptibilidad a la erosión f.- Inundabilidad g.- Estabilidad de Taludes
Cobertura Vegetal	h.- Interés ecológico y botánico
Uso actual del suelo	d.- Evaluación de usos prioritarios
Distancia a zonas urbanas ya existentes	j.- Accesibilidad

Por otra parte, la accesibilidad (factor «j» en el cuadro I) será evaluada en función de la distancia a zonas urbanas. Con las posibilidades que ofrece el SIG PC-ARC/INFO (ESRI, 1992) y la base de datos del SIACLAV, generaremos una nueva cobertura, la cual representará polígonos equidistantes a las áreas urbanas existentes en la cuenca del lago de Valencia. Esta cobertura contendrá polígonos con cuatro atributos referentes a la distancia a espacios urbanos (ver cuadro IV.e).

*El peso o influencia relativa de cada factor.*—Para establecer los pesos de los factores desde el punto de vista de la capacidad de acogida para la urbanización hemos optado por el proceso analítico jerárquico de Saaty (1980, 1987), en el cual los pesos ( $w_i$ ) asignados a los factores se obtienen del eigenvector principal de una matriz de comparación entre pares de factores (ver cuadro II), en la cual se establece la importancia (proporcional) relativa de los factores indicados en las filas respecto a los indicados

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

en las columnas, en relación a su incidencia en el asentamiento urbano. Por ejemplo, en nuestro caso, se considera que el uso del suelo existente en cada punto es 3/4 veces menos importante que la pendiente de esa zona.

A través del comando WEIGHT de IDRISI (Eastman, 1993) se introduce la matriz de comparación para obtener así los valores del eigenvector principal de cada fila, correspondientes a los valores  $w_i$  de cada factor. Asimismo el comando mencionado provee un parámetro de consistencia acerca del procedimiento de obtención de los  $w_i$  (basado en los valores introducidos en la matriz), dicho parámetro, llamado razón de consistencia (*consistency ratio*, *cr*), indica la probabilidad de que los valores obtenidos a partir de la matriz hayan sido aleatoriamente generados. El *cr* debe ser inferior a 0'10 para considerar la matriz consistente, en nuestro caso dicho valor fue 0 (cero).

CUADRO II  
MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES DE FACTORES PARA LA APLICACIÓN  
DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

Factores	Pend.	Balace Morfod.	Uso del suelo	Litología	Cobertura vegetal	D. zonas urbanas	Pesos $W_i$
Pendient.	1						0,25
Bal. Mor.	1	1					0,25
Uso Suel.	3/4	3/4	1				0,18
Litología	1/2	1/2	2/3	1			0,13
Cob. V.	1/2	1/2	2/3	1	1		0,13
Dist. ZU	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	0,06

Los valores  $w_i$  (pesos) obtenidos (que sumados deber ser iguales a 1) fueron posteriormente reescalados (entre los valores 1 —0'13— y 4 —0'25—), obteniendo así los pesos finales que se describen en la ecuación siguiente:

$$C = 4P + 4BM + 3US + 2L + 2CV + D \times LIM$$

**MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...**

Donde:

C	= Capacidad de asentamiento
P	= Pendiente (peso = 4)
BM	= Balance morfodinámico (4)
US	= Uso del suelo (3)
L	= Litología (2)
CV	= Cobertura vegetal (2)
D	= Distancia a zonas urbanas (1)
LIM	= Limitantes ( <i>constraints</i> )

*Los valores de capacidad de cada variante de los diferentes factores.*— La asignación de valores ordinales a las clases cualitativas (nominales) de las variables que se han considerado incidentes en el proceso de urbanización, conlleva considerar una serie de criterios sobre las cualidades específicas que debe reunir un espacio para ser urbanizable, asimismo, los objetivos del modelo serán, en cierta medida, determinantes de esta asignación de valores ordinales.

La escala con la que se miden los atributos temáticos consta de seis valores y una clase excluyente, esta escala valora en términos relativos de mayor a menor la capacidad de una categoría dentro de una cobertura para recibir ocupación urbana (ver cuadro III).

CUADRO III  
VALORES RELATIVOS ASIGNADOS A LAS CATEGORÍAS DE CADA COBERTURA  
PARA RECIBIR UNA OCUPACIÓN URBANA

Valor $x_i$	Influencia en la Capacidad
0	Mínimo valor en la capacidad
1	.
2	.
3	.
4	.
5	Máxima disponibilidad de capacidad de acogida
- 100	Clase excluyente

---

JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE

---

El valor 0 (cero) representa las clases de una variable que ofrecen la más baja capacidad de acogida para la ocupación urbana, esta escala aumenta sucesivamente hasta llegar al máximo valor, 5 (cinco), que será asignado a las clases que ofrezcan la máxima capacidad de acogida para la ocupación urbana, asimismo hemos incluido una clase excluyente para las categorías que restrinjan absolutamente la ocupación urbana en los lugares con esa categoría en cada cobertura.

En el cuadro IV.a-f se presenta la asignación de los valores  $x_i$  a las categorías de cada variable, de esta manera obtendremos una serie de coberturas con valores de capacidad para la urbanización, los cuales han sido fijados considerando una serie de aspectos para cada una de ellas que comentamos seguidamente.

— La variable *balance morfodinámico* evalúa tres importantes factores que afectan al proceso de urbanización: susceptibilidad a la erosión, inundabilidad y estabilidad de taludes (ver cuadro I); la cobertura «geomorfología» del SIACLAV contiene entre sus atributos uno correspondiente al balance morfodinámico de cada polígono, para los cuales realizamos una valoración según su capacidad para la actividad urbana (cuadro IV.a).

— La valoración de los atributos pertenecientes a la cobertura de *uso actual del suelo* se realizó con un criterio basado en la productividad de los usos agrícolas del área, incluyendo las áreas o instalaciones urbanas en la clase «no urbanizable» del rango de valoraciones, para excluirlas posteriormente, como es lógico, de las áreas urbanizables que resultarán de la ejecución del modelo (cuadro IV.b).

— La *pendiente* entendida como «la inclinación del terreno respecto a un plano horizontal» (CEOTMA, 1991:146) es un elemento que condiciona de manera importante cualquier actividad de tipo urbano que se pretenda desarrollar sobre un territorio, en ocasiones puede considerarse como el principal elemento restrictivo para determinadas actividades humanas sobre el territorio.

Existen diferentes clasificaciones de la pendiente según la finalidad del estudio que se esté realizando, para el caso concreto de estudios urbanos, la clasificación propuesta por el *State Geological Survey of Kansas* (CEOTMA, 91) presenta una asignación de rangos de pendiente en relación con los diferentes usos urbanos implantables en cada uno, en

---

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

---

base a dicha clasificación, y considerando adicionalmente la clasificación de Marsh (1978) que plantea los posibles procesos de erosión en relación con la pendiente y usos del suelo, hemos asignado los valores de capacidad para el asentamiento urbano ( $x_1$ ) según la pendiente (ver cuadro IV.c).

— Considerando que «las características mecánicas de las rocas determinan la posibilidad de levantar en una zona grandes estructuras» (CEOTMA, 1991:61), es fundamental, para un estudio de crecimiento urbano, incluir la variable *litología* y su relación con la capacidad del territorio de soportar edificaciones.

Uno de los factores que condiciona la capacidad de soportar estructuras en un territorio determinado es la textura del suelo. El cual, según una definición ingenieril o de construcción, podría conceptualizarse como un «compuesto de todos los materiales no consolidados, meteorizados o alterados de su condición original y situados sobre un lecho rocoso, duro y consolidado» (Way, 1973).

En base al anterior concepto de suelo con fines ingenieriles o para construcción, tenemos que considerar las características de éstos según su material originario. El *Soil Survey Staff* (1951) define el material originario de un suelo como la masa no consolidada a partir de la cual se desarrolló el suelo. Este material originario a su vez se formó por meteorización a partir de la roca madre. Pudiéndose definir así, según su origen, tres tipos de suelo:

1. Suelos residuales: El material originario es resultante de la meteorización *in situ* de lechos rocosos, roca madre, duros o blandos.
2. Suelos transportados: El material originario ha sido transportado de su lugar de origen y depositado en el actual.
3. Suelos de acumulo: Formados por materiales orgánicos (CEOTMA, 1991:206).

De estos tres tipos de suelos clasificados según su origen, es importante tener en cuenta que sus cualidades desde el punto de vista de su utilización en ingeniería y construcción dependen fundamentalmente de las características de la roca madre, de la cual proceden por alteración, o de las configuraciones territoriales, producidas por el transporte de la roca madre alterada.

**JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE**

**CUADRO IV**  
**ASIGNACIÓN DE VALORES X<sub>i</sub> (CAPACIDAD DE ACOGIDA) A LAS CATEGORÍAS**  
**DE CADA COBERTURA**

(a)		(b)	
<b>Balance morfodinámico</b>		<b>Uso del suelo</b>	
<b>Tipo de medios</b>	<b>Valor x<sub>i</sub></b>	<b>Categorías de uso</b>	<b>Valor x<sub>i</sub></b>
Erosión en surcos y cárcavas locales	- 100	Áreas residenciales	- 100
Erosión en surcos y cárcavas generalizadas	- 100	Áreas industriales	- 100
Profundización de entalles torrenciales	- 100	Uso Institucional	- 100
Movimientos en masa	- 100	Uso servicios	- 100
Movimientos en masa asociados a profundización de entalles	- 100	Horticultura comercial	0
Inundaciones estacionales	- 100	Fruticultura comercial	0
Transporte de materiales por efecto de oleaje	- 100	Plantación	0
Medios estabilizados con potencial alto de erosión	0	Agric. subsistencia y semi-comercial	2
Medios estabilizados con potencial moderado de erosión	2	Ganadería intensiva	- 100
Medios aparentemente estables	5	Ganadería semi-intensiva	0
Medios estables con potencial de inundación	- 100	Ganadería extensiva	3
Medios estables con problemas por exceso de agua	- 100	Canteras	- 100
		Tierras sin uso	5
		<b>Pendiente</b>	
		<b>Rango (%)</b>	<b>valor x<sub>i</sub></b>
		0 - 8	5
		8,1 - 15	4
		15,1 - 25	2
		25,1 - 35	1
		35,1 - 50	0
		50,1 y más	0

(c)

**MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...**

**CUADRO V**  
**CLASES DE CAPACIDAD ASIGNADAS A LOS MODELOS**

Litología	
Tipo de Litología	Valor $x_i$
Granito	4
Sienita	5
Diorita	5
Gabro	5
Peridotita	5
Basalto	5
Tobas	4
Lutitas	5
Areniscas	4
Calizas	5
Pizarras	5
Micaesquistos	5
Gneiss	4
Aluvi3n	5

(d)

(e)

Distancia a zonas urbanas (Km)	Valor $x_i$
< 1	5
1 - 5	3
> 5	2

(f)

Cobertura Natural		
Tipo de cobertura	Tipo de intervenci3n	Valor $x_i$
Bosque	Sin intervenci3n	0
	I. leve	0
	I. moderada	1
	I. fuerte	2
Matorral	Sin Intervenci3n	4
	I. leve	4
	I. moderada	5
	I. Fuerte	5
Sabana abierta	-	5
Sabana con chaparro	-	5
Asociaci3n sabana abierta y bosque	-	0
Asociaci3n sabana con chaparro y bosque	-	0
Suelo descubierto	-	5

---

JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE

---

De lo expuesto anteriormente se desprende que en base a un análisis de la litología y las formas del terreno de una determinada zona se pueden llegar a conocer ciertas características de los suelos resultantes, como puede ser en una medida aproximativa la textura. Por otra parte, la propuesta del Sistema Unificado Americano de Clasificación Textural de Suelos, define ciertas características de suelos y la relación existente para la capacidad para soportar edificaciones de los mismos (CEOTMA, 1991:164-196).

Siguiendo este razonamiento de análisis hemos establecido una caracterización de las zonas de la cuenca del lago de Valencia según su litología, para la capacidad de soporte de estructuras: en concreto, a la porción aluvial, constituida principalmente por la extensa planicie aluvial de la cuenca del lago de Valencia, se le ha asignado una valoración alta, debido a constataciones del tipo de textura del área, basadas en fuentes de información ajenas al Sistema de Información Ambiental de la Cuenca del Lago de Valencia (ver Guevara, 1983:99-101). Las cuales indican la existencia de suelos clase I y I-II, según la clasificación de suelos por capacidad de uso, siendo éstos altamente productivos desde el punto de vista agrológico, y bien equilibrados texturalmente, contando con contenidos bajos de arcillas plásticas. En base a esto y a la clasificación propuesta por Watson (Watson, 1983:106) para materiales ingenieriles no consolidados, los suelos aluviales de la planicie del lago de Valencia son aptos para soportar estructuras (fundaciones, cimientos, vías y otros).

Entre los atributos de la cobertura de SIACLAV «geología» se presenta la litología dominante y la secundaria de cada polígono; la asignación de valores ( $x_i$ ) a cada categoría, en la cobertura de datos, se realizará considerando el valor de menor capacidad de ambos tipos litológicos en cada caso (ver cuadro IV.d).

— La cobertura de *distancia a zonas urbanas existentes* medirá la accesibilidad a zonas ya urbanizadas en la zona de estudio, ésta ha sido clasificada en tres rangos de accesibilidad (ver cuadro IV.c).

— La variable *cobertura natural* permite evaluar el impacto ambiental que se producirá por la sustitución de cada tipo de vegetación actual por la ocupación urbana, considerando, para ello, el valor ecológico y botánico de las diferentes formaciones vegetales del área. Dicha valora-

---

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

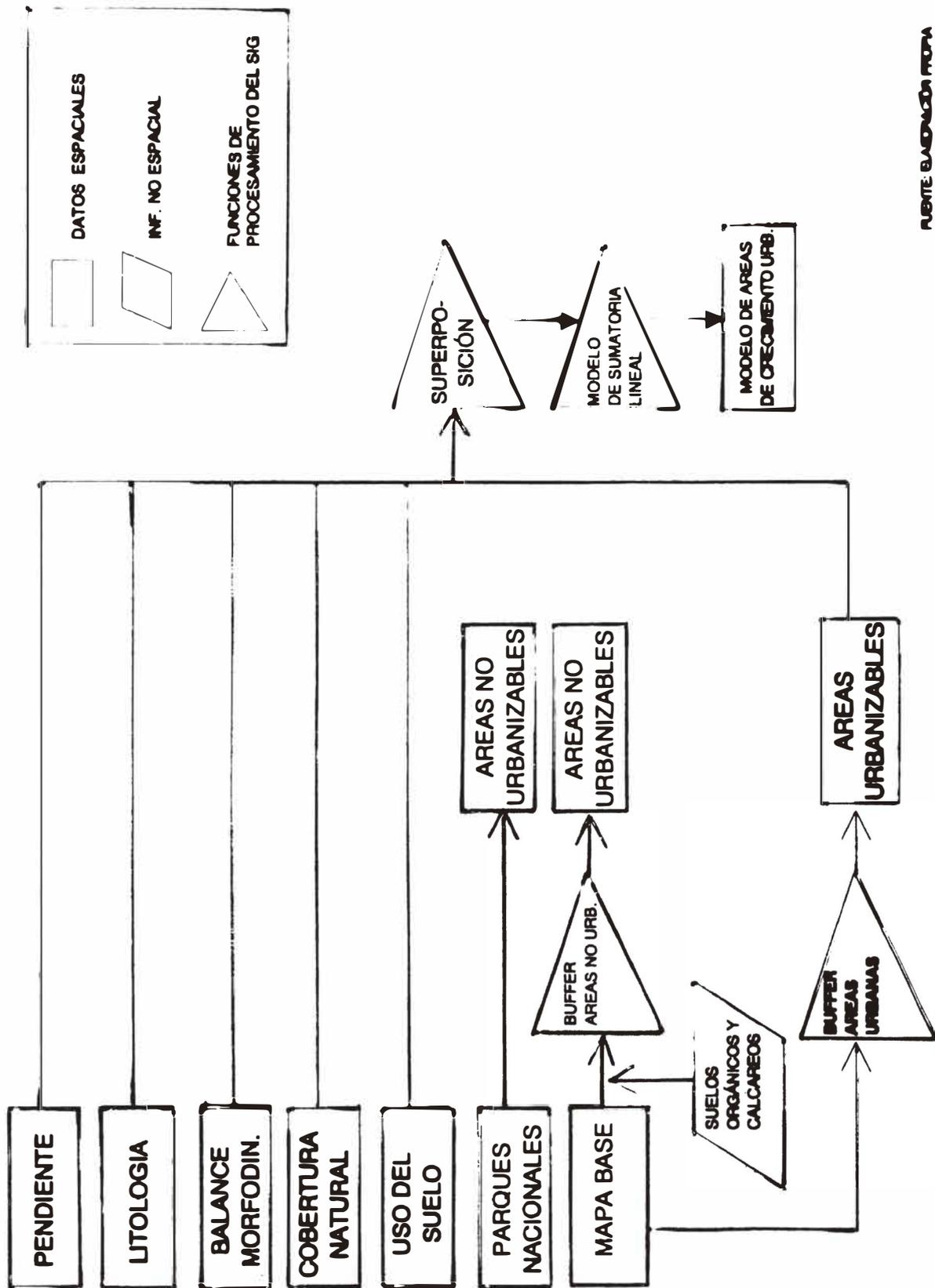
---

ción se realizará considerando también el grado de intervención antrópica a la que ésta (la ocupación existente) haya sido sometida.

Un antecedente relacionado con todo ello es el presentado por Gómez Orea (1992:136) referido al Plan Especial de Protección del Medio Físico de la Provincia de Madrid 1973-1975, en el cual se asigna un valor ecológico a un determinado ecosistema antes de definir qué tipo de uso podría implantarse en él, así en dicho informe se dividen los criterios para la clasificación de áreas en ecológicos y de productividad; en referencia a los criterios ecológicos se definen tres tipos posibles de ecosistemas: íntegros o poco degradados, masas arbóreas de relativa conservación y ecosistemas degradados o de sustitución. Siendo clasificados como áreas urbanizables únicamente aquellas correspondiente al tercer tipo de ecosistema. Combinando estos criterios se diferencian los diversos niveles de capacidad para la urbanización en función de la ocupación actual del suelo (ver cuadro IV.f).

La estructura lógica seguida para la implementación de los modelos se describe en las figuras 2 y 3, en las cuales a partir de las coberturas originales de la base de datos (SIACLAV) obtuvimos los modelos de capacidad de urbanización. Para la obtención de ambos modelos hemos seguido la estructura lógica referida en las figuras, obteniendo así dos modelos de capacidad en cada uno de los tipos de datos considerados, vectorial y raster.

*El modelo de capacidad para la urbanización con datos vectoriales.*— Para la obtención del modelo de capacidad vectorial hemos utilizado el programa informático PC-ARC/INFO (ESRI, 1992); como se aprecia en la figura 2, a los polígonos de las coberturas originales se les asignó un valor de capacidad (referido en el cuadro IV.a-f), dependiendo de los atributos asociados, obteniendo así un conjunto de coberturas de capacidad que fueron superpuestas posteriormente con el comando UNION para obtener una cobertura de polígonos con atributos de capacidad ( $x_i$ ) asociados de cada una de las coberturas (factores) consideradas en la ecuación 2, posteriormente, en la base de datos temática (PAT), asociada a la cobertura de polígonos creada de la superposición, realizamos las operaciones aritméticas correspondientes a la ecuación 2 en el módulo TABLES del programa mencionado, obteniendo así el atributo de capacidad (C), asociado a cada polígono, con valores entre 13 y 70, indicando los valores más altos, mayor capacidad de asentamiento para la urbanización y viceversa.



FUENTE: BALBUENA FLORES

FIGURA 2.—Estructura lógica del modelo de capacidad (vectorial)

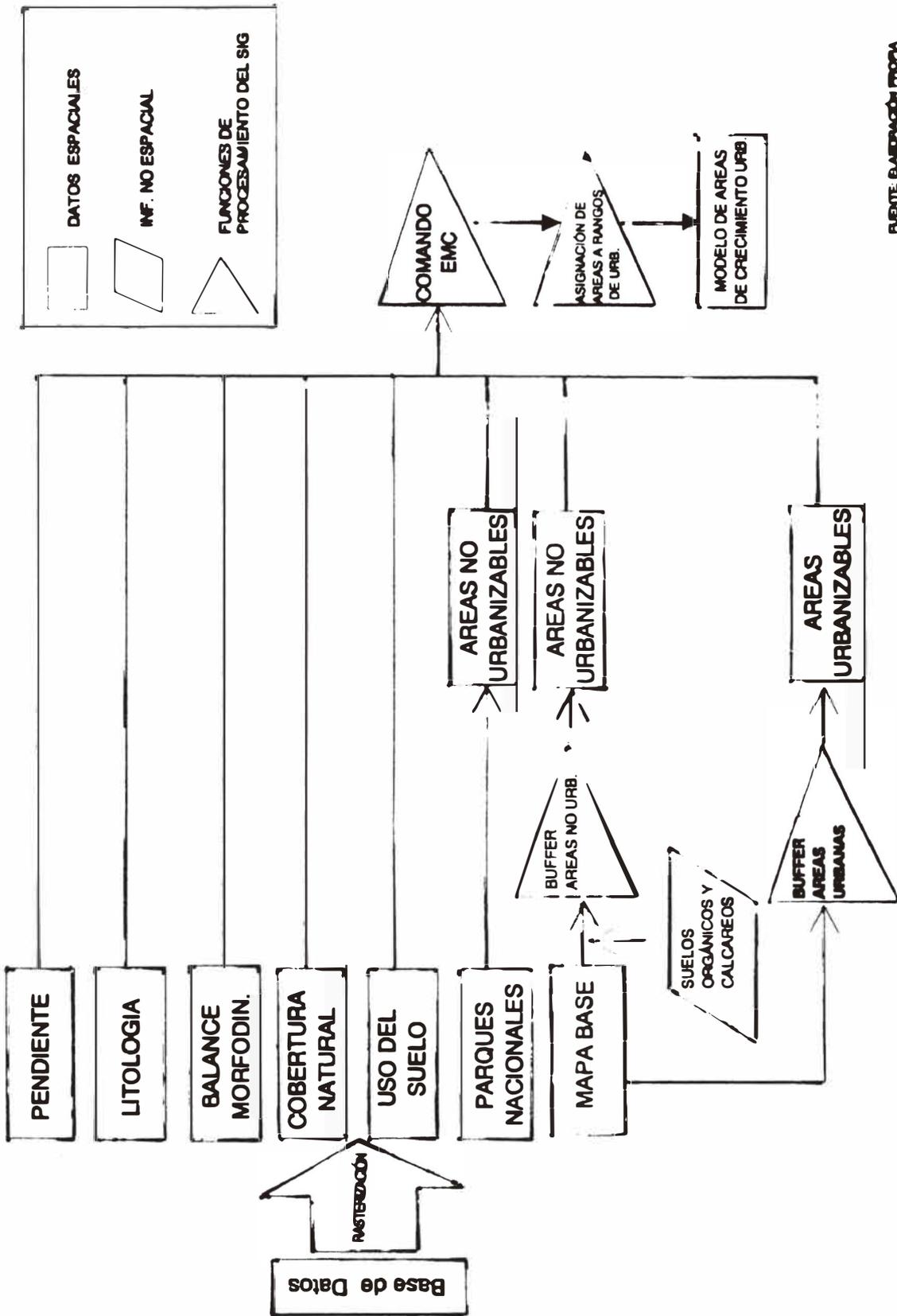


FIGURA 3.—Estructura lógica del modelo de capacidad (raster.)

---

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

---

*El modelo de capacidad para la urbanización con datos raster.*—En este caso partimos de las coberturas vectoriales en formato ARC/INFO (ESRI, 1992), las cuales fueron rasterizadas con el comando POLYGRID (de ARC/INFO —ESRI, 1992—) con un tamaño de *pixel* de 100 x 100 m. Se ha considerado para esta elección lo planteado por Star y Estes (1990:37) acerca de que el tamaño de *pixel* de una cobertura raster debe ser al menos la mitad de la longitud más corta representada en la cobertura fuente, siendo la unidad mínima cartografiable en las coberturas de entrada de 0'25 Km<sup>2</sup> (en escala 1:100.000).

Una vez rasterizadas las coberturas éstas fueron reclasificadas a los valores de capacidad establecidos, de modo similar al de las coberturas vectoriales (ver cuadro IV).

Luego, a través del comando EMC de IDRISI (Eastman, 1993) (el cual permite la ejecución de una sumatoria lineal ponderada para obtener una cobertura con valores asignados a cada *pixel* correspondiente a la capacidad calculada), se integran las coberturas en un modelo de sumatoria lineal ponderada, en el cual se introducen asimismo los pesos ( $w_i$ ), de cada cobertura, obteniendo así el modelo de capacidad de urbanización en modelo raster (ver figura 3).

Este modelo, de igual manea que el vectorial, ha asignado a los *pixels* valores desde 13 hasta 70, indicando diferentes niveles de capacidad de menor a mayor.

### *Presentación y análisis de resultados*

A partir de los modelos calculados hemos obtenido dos coberturas, una en modelo vectorial y otra en raster, las cuales tienen asignado el atributo de capacidad de asentamiento urbano (C), la primera en los polígonos y la segunda en los *pixels*. Como hemos comentado, ambas coberturas coinciden en los valores mínimo y máximo, 13 y 70 respectivamente (ver figuras 4 y 5).

Para poder establecer una comparación cuantitativa entre las coberturas obtenidas hemos generado un raster a partir de la vectorial, con un tamaño de *pixel* igual que la cobertura del modelo raster (100 x 100 m.), con el fin de poder realizar un análisis de superposición y tabulación

**MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...**

cruzada que nos permitirán establecer comparaciones entre los resultados numéricos y espaciales de ambos procedimientos.

Para establecer la similitud de ambos modelos de capacidad llevamos a cabo una superposición (de sustracción) entre las coberturas raster obtenidas de cada uno de los modelos elaborados (comando OVERLAY de IDRISI —Eastman, 1993—), obteniendo así una cobertura en la que predominan los valores 0 (cero), consecuencia directa de la cuasi-perfecta similitud espacial y de capacidad asignada entre los resultados de los dos modelos, únicamente se aprecian en la cobertura, producto de la sustracción, algunos *pixels* dispersos con valores diferentes a 0 (cero), posiblemente resultado de los procesos de rasterización, en los cuales las zonas fronteras de los polígonos pueden generar estas pequeñas diferencias en la rasterización (en este caso menores de 100 m., ya que este es el tamaño de *pixel* utilizado). Así podemos establecer la similitud entre los resultados obtenidos con los dos tipos de datos empleados.

Para la representación gráfica de los resultados hemos agrupado las 57 clases resultantes (valor «C» mínimo = 13 y máximo = 70; 70 - 13 = 57) en seis grupos de capacidad de urbanización y una clase excluyente. La agrupación se llevó a cabo a través del percentil 16'67 %, obteniendo la distribución de grupos que se muestra en el cuadro V.

**CUADRO V**  
**MATRIZ DE TABULACIÓN CRUZADA ENTRE LOS MODELOS DEFINIDOS**  
**(VECTORIAL Y RASTER) EN PORCENTAJE, NO SE INCLUYEN LAS ZONAS**  
**EXCLUYENTES (VALOR 0 —CERO—)**

<b>Clase de Capacidad</b>	<b>Grupo</b>	<b>Rango de Valores "C"</b>	<b>Rango %</b>	<b>Superficie Asignada (Km<sup>2</sup>)</b>
Extremadamente Baja	6	13 - 26	0 - 16,67	128,36
Muy Baja	5	27 - 34	16,68 - 33,34	184,25
Baja	4	35 - 41	33,35 - 50,01	36,51
Media	3	42 - 52	50,02 - 66,69	45,63
Alta	2	53 - 61	66,70 - 83,37	77,96
Excelente	1	62 - 70	83,38 - 100	36,35

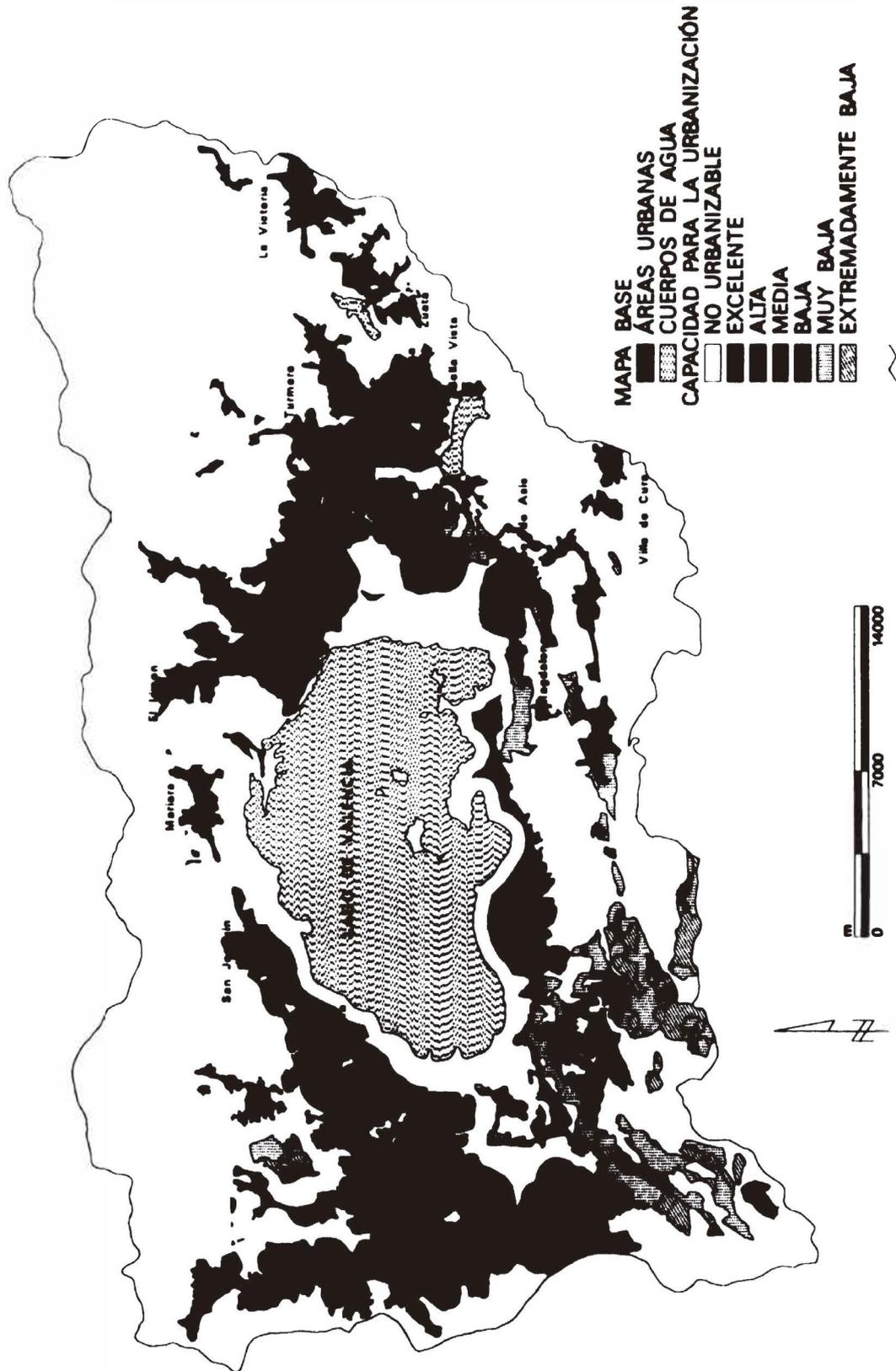


FIGURA 4.—Modelo de capacidad para la urbanización (vectorial)

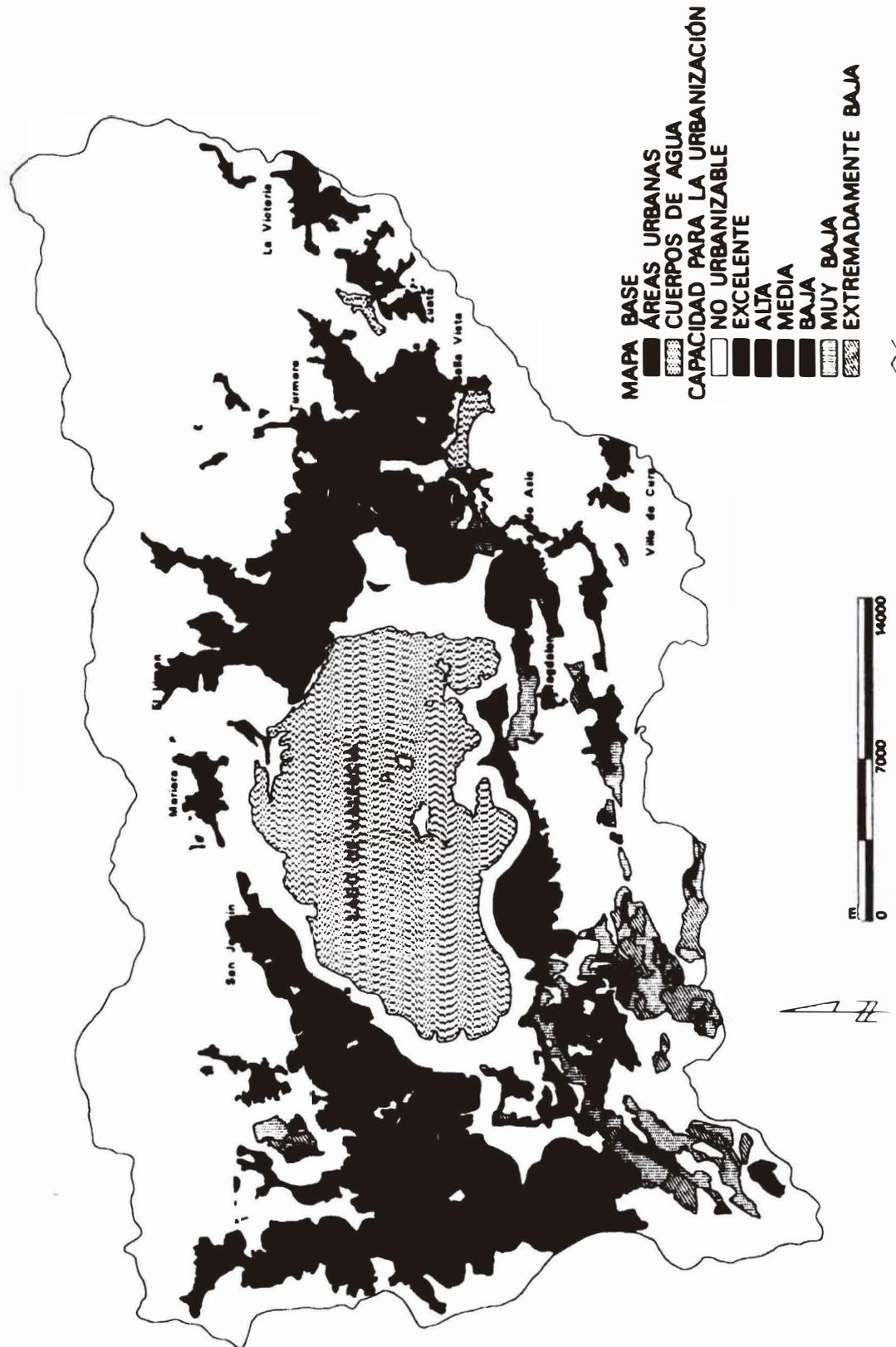


FIGURA 5—Modelo de capacidad para la urbanización (raster)

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

Para validar estadísticamente los grupos formados llevamos a cabo un test de comparación de medias aritméticas con el fin de determinar si los grupos son significativamente diferentes en cuanto a su capacidad de acogida. El resultado de dicho test, a un nivel de confianza del 99 % (nivel de significación del 0'01), indica que los grupos formados son significativamente diferentes, ya que la zona crítica en la tabla según la curva *normal* ( $Z_c = | 2'33 |$ ) fue superada para cada par de grupos de la manera siguiente:  $Z_e (1'2) = 317'65$ ,  $(2'3) = 170'0$ ,  $(3'4) = 182'4$ ,  $(4'5) = 311'02$  y  $(5'6) = 286'0$ .

Una vez obtenidas las coberturas de grupos de capacidad (ver figuras 4 y 5) llevamos a cabo una tabulación cruzada entre ambos, ver cuadro VI, confirmando así la similitud entre los dos modelos desarrollados, diferenciándose éstos únicamente en algunos *pixels* dispersos correspondientes a las fronteras de los polígonos y en la mejor representación gráfica del modelo vectorial, ya que a la escala de trabajo real (1:100.000) el «escalonado» producido por los *pixels* en el modelo raster destacarían, frente a una mejor o más realista representación de los datos espaciales en el modelo vectorial.

CUADRO VI  
MATRIZ DE TABULACIÓN CRUZADA ENTRE LOS MODELOS DEFINIDOS  
(VECTORIAL Y RASTER) EN PORCENTAJE, NO SE INCLUYEN LAS ZONAS  
EXCLUYENTES (VALOR 0 —CERO—)

		Vectorial						Total
		1	2	3	4	5	6	
R a s t e r	Grupos							
	1	25,25	0	0	0	0	0	25,25
	2	0,01	36,21	0	0	0	0	36,22
	3	0	0	7,15	0	0	0	7,15
	4	0	0	0,01	8,92	0,01	0	8,94
	5	0	0	0	0,01	15,29	0,01	15,31
	6	0	0	0	0	0,01	7,12	7,13
Total	25,26	36,21	7,16	8,93	15,31	7,13	100	

---

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

---

*Evaluación de los costes de obtención de los dos modelos, ventajas e inconvenientes*

Como se puede apreciar en las figuras 1 y 2 los procesos de cálculo de ambos modelos coinciden en muchos aspectos: inicialmente, la selección y reclasificación de las coberturas originales en valores de capacidad ( $x_i$ ), para la obtención de las coberturas que participarán en el procedimiento de la sumatoria lineal, se realizará de manera similar en ambos modelos de datos. Sin embargo, la diferencia más destacable se aprecia en el momento de la realización de dicho procedimiento.

En el modelo vectorial, la ejecución del modelo planteado en la ecuación 1, se lleva a cabo introduciendo una secuencia lógica de instrucciones y valores (ver —superposición— en la figura 1) debiendo utilizar una serie de comandos y operaciones hasta lograr la cobertura (de polígonos), con valores de capacidad. Por otra parte, en el modelo establecido en formato raster, existe un comando específico para la realización del procedimiento general de la sumatoria lineal ponderada, facilitando así notablemente la obtención de la cobertura de capacidad (ver —comando EMC— en la figura 2).

Otro aspecto a destacar es el menor tiempo empleado en la ejecución de los comandos en el modelo raster (trabajando sobre la misma plataforma física —*hardware*— un PC-386, 40 Mhz), lo que reduce notablemente el coste de este modelo, resultando en una mayor velocidad para la obtención de los resultados finales.

Una ventaja destacable del modelo vectorial sobre el raster es la posibilidad de incluir una serie de atributos en una cobertura específica; en el caso de la cobertura de capacidad los polígonos tenían asignado además del valor «C» los atributos  $x_i$  y los códigos originales de las coberturas inicialmente incluidas en la superposición, lo que facilita ciertos procedimientos de revisión final de los grupos o clases de capacidad establecidos, sin necesidad de tener que disponer de otras coberturas para tales fines.

Asimismo, la característica comentada de la multiplicidad de atributos, susceptibles de ser asignados a un determinado tipo de entidad espacial en el modelo vectorial (puntos, líneas o polígonos), puede potenciar la utilización de otros tipos de procedimientos de EMC (como: índices

---

*JOSÉ I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE*

---

de concordancia-discordancia, optimización jerárquica, análisis de punto ideal, procedimiento de las precedencias u otros) a través de cadenas comandos, o bien con programación SML de ARC/INFO (ESRI, 1992).

La producción de cartografía se realiza de manera más versátil y rápida en el modelo vectorial que el raster, constituyendo esto una ventaja para la producción de los documentos analógicos finales de los modelos de capacidad. Así, para la producción de las figuras 1 y 2, hemos utilizado el programa ARC/VIEW (ESRI, 1992b), vectorizando la cobertura correspondiente al modelo obtenido con los datos raster para su representación gráfica.

En el ámbito de costos económicos el programa ARC/INFO (ESRI, 1992) supera considerablemente en su precio a IDRISI (Eastman, 1993), lo cual en ciertas ocasiones puede ser un elemento de importancia para la elección del modelo de datos a utilizar, independientemente de la capacidad de gestión de datos de cada uno.

### *Conclusiones*

1.º El resultado obtenido en ambos modelos de datos espaciales puede considerarse similar espacial y numéricamente, lo que era, en parte, de esperar, ya que el procedimiento aritmético utilizado fue el mismo en ambos modelos de datos. Sin embargo, son notables las diferencias en el proceso de implementación en cada uno de los modelos de datos, siendo notablemente más costoso en tiempo y operaciones el vectorial, dada la capacidad del programa raster utilizado para la implementación del procedimiento de la sumatoria lineal en forma de un comando específico.

2.º Considerando los mapas de clases de capacidad de urbanización (ver figuras 4 y 5) realizados a partir de los dos tipos de datos empleados, se confirman los problemas para el crecimiento urbano que presentan algunos núcleos urbanos en la cuenca del lago de Valencia, específicamente las ciudades de mayor tamaño, tales como Maracay, Mariara, Las Tejerías y las zonas norte y oeste de Valencia. Sin embargo, en dichos mapas se han definido una serie de zonas que, si bien en algunos casos no ofrecen una capacidad «excelente», sí muestran niveles de capacidad «altos» y «medios». Por otra parte, debemos tener en cuenta que el presente estudio ha sido realizado a un nivel de información preliminar, ya que requiere

---

*MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...*

---

estudios más detallados y específicos a escalas mayores que corroboren la capacidad obtenida por dichas áreas en el modelo aquí desarrollado.

3.º Los mapas antes citados muestran las posibilidades del método planteado, para facilitar la ordenación del territorio de un modo que tome en cuenta una amplia variedad de factores, facilitando una actuación planificadora más sutil y adecuada a la complejidad de los problemas territoriales.

Este tipo de procedimientos ofrecen una importante herramienta para la solución de problemas espaciales, ya que permiten integrar en un solo conjunto de datos múltiples factores y criterios, así como distintos niveles de importancia para los mismos, asistiendo de esta forma a procesos más amplios de planificación y ordenación del territorio, lo que conlleva a una más integral gestión de espacios urbanos y regionales.

Asimismo, el desarrollo de procedimientos de EMC que incluyan además de como en este caso problemas con un solo objetivo, aquellos en los que se integran múltiples objetivos, supone un importante hito en la gestión del territorio, así como en la solución de problemas espaciales complejos en una plataforma SIG.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ALEGRE, P. (1983): «Una aplicació del Programa MAP a Catalunya», Barcelona, Departamento de Geografía, Universidad Autónoma, España, 156 pp.
- BARREDO, J. (1993): «Modelo cartográfico para determinar áreas de crecimiento urbano a través de un SIG. Cuenca del lago de Valencia (Venezuela)», Trabajo de Investigación, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, Madrid.
- BARREDO, J. (1994): «Integración de evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para la asignación/localización de asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Valencia (Venezuela)», comunicación al II Congreso del Grupo de América Latina, A.G.E., Universidad de Salamanca, del 21 al 23 de junio de 1994, Salamanca.
- BARREDO, J. (1995): «Aplicación de técnicas de análisis espacial integrando la evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para la realización de estudios de localización/asignación de actividades», tesis doctoral de la Universidad de Alcalá, Departamento de Geografía.
- BARREDO, J. y BOSQUE, J. (1995): «Integración de evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio y la asignación de usos del suelo», actas del IV Congreso de la Asociación Española de Sistemas de Información Geográfica, Barcelona.
- BIRKIN, M.; CLARKE, G. P.; CLARKE, M., y WILSON, A. G. (1987): «Geographical Information

---

**JOSE I. BARREDO y JOAQUÍN BOSQUE**


---

- Systems and model based locational analysis; shups in the night of the beginnings of a relationships?», WP-498, School of Geography, University of Leeds, Leeds.
- BOSQUE, J. y otros (1991): «Factores en la dinámica de la ocupación del suelo», en Proceedings III Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica, octubre de 1991, Viña del Mar, Chile.
- CAN, A. (1993): «Residential quality assessment. Alternative Approaches using GIS», en M. Fischer y P. Nijkamp (eds.), 1993, *Geographic Information Systems, Spatial Modelling and Policy Evaluation*, Springer-Verlag, Berlín.
- CARVER, S. (1991): «Integrating multi-criteria evaluation with Geographical Informations Systems», *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 5, n. 3, pp. 321-339.
- CEOTMA (1991): Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología*, 3.<sup>a</sup> edición, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1.<sup>a</sup> edición 1981, Madrid.
- CHUVIECO, E. (1990): *Fundamentos de teledetección espacial*, Rialp, Madrid.
- CHUVIECO, E. (1993): «Integration of linear programming and GIS for land-use modelling», *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 7, n. 1, pp. 71-83.
- EASTMAN, J. (1993): *IDRISI, a grid based Geographyc Analysis System*, version 4.1, Clark University, Graduate School of Geography, Worcester, Massachusetts.
- EASTMAN, J. R.; KYEMP, P. A.; TOLEDANO, J., y JIN, W. (1993): *GIS and Decision Making*, United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Ginebra.
- EGEOGRAN (1993): «Bases físicas para una ordenación territorial de la vertiente sur de Sierra Nevada (Alpujarra, Granada)», Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada, n. 11, Granada, España.
- ESRI (1992): *PC-ARC/INFO*, versión 3.4D Plus, Environmental Systems Research Institute, California, EE.UU.
- ESRI (1992b): *ARC-VIEW*, versión 1.0, Environmental Systems Research Institute, California, EE.UU.
- GÓMEZ OREA, D. (1992): *Evaluación de impacto ambiental*, Librería Agrícola, Madrid.
- GRAY DE CEDRÁN, N. (1991): «Capacidad portante del medio urbano», en Proceedings III Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica, octubre de 1991, Viña del Mar, Chile.
- GUEVARA, J. M. (1983): *Geografía de las regiones central y capital*, Editorial Seix-Barral Venezolana, Caracas, Venezuela.
- LASANTA, M. y otros (1989): «Evolución superficial del espacio cultivado en Cameros Viejo (Sistema Ibérico) y su relación con algunos factores geocológicos», *Estudios Geográficos*, n. 197, España.
- MARSH, W. (1978): *Environmental Analysis for Land Use and Site Planning*, Mc Graw-Hill, New York.
- MC HARG, I. (1969): *Desing with Nature*, The Natural History Press, New York.
- RUIZ PÉREZ, M. y otros (1990): «Diseño de un Sistema de Información Geográfica Raster para la planificación territorial», en actas del IV Coloquio de Geografía Cuantitativa, A.G.E., Palma de Mallorca, España.
- SAATY, T. (1980): *The analyticial hierarchy process*, Mc Graw-Hill, New York.
- SAATY, T. (1987): *Concepts, theory and techniques: Rank generations, preservation and reversal in the analytical hierarchy decision process*, *Decision Sciences* 18, pp. 157-177.
- SOIL SURVEY STAFF (1951): *Soil Survey Manual*, U.S. Department of Agriculture Handbook, n. 18, U.S. Department of Agriculture, Washington.

---

**MODELADO ESPACIAL INTEGRADO SIG...**

---

- STAR, J. y ESTES, J. (1990): *Geographic Information Systems: an Introduction*, Englewood Cliffs, New York, Prentice-Hall.
- TURKSTRA, J. (1991): «An Application of GIS to Townplanning case Study Manizales, Colombia», en *Proceedings EGIS91, Second European Conference on Geographical Information Systems*, vol. 2, Bélgica.
- VOOGD, H. (1983): *Multi-criteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, Londres.
- WATSON, J. (1983): *Geology and Man*, Editorial George Allen and Unwin, Londres, Reino Unido.
- WAY, D. (1973): *Terrain Analysis. A Guide to Site Selection Using Aerial Photographic Interpretation*, Community Developments Series, Hutchinson and Ross, Stroudsburg.