

Santos Preciado, José Miguel
Cocero Matesanz, David

**LOS SIG RASTER: HERRAMIENTA DE ANÁLISIS
MEDIOAMBIENTAL Y TERRITORIAL**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	4
II. CONTENIDO.....	4
1. ¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica?.....	4
2. ¿Para qué sirven los Sistemas de Información Geográfica?.....	5
3. Los principales modelos y estructuras de datos espaciales.....	6
3.1. La estructura espacial del modelo raster.....	6
3.2. La estructura espacial del modelo vectorial.....	8
4. Descripción más detallada del modelo raster	9
4.1. La recogida de la información digitalizada en un modelo raster	10
Las imágenes de satélite: la técnica de la Teledetección	10
La digitalización raster automática: el barredor óptico	12
La rasterización de la información digital en formato vectorial	12
4.2. Funcionalidades básicas de los Sistemas de Información Geográfica	12
4.2.1. Operaciones locales de los SIG raster.....	13
Operaciones de reclasificación.....	13
Operaciones de superposición	15
<i>La superposición lógica</i>	15
<i>La superposición algebraica</i>	16
<i>Intersección o cruce de mapas nominales u ordinales</i>	17
<i>Enmascarado de mapas</i>	17
4.2.2. Las operaciones de vecindad en un SIG raster	18
Operaciones de vecindad inmediata.....	18
<i>El filtrado de mapas</i>	18
<i>El cálculo de la pendiente</i>	19

<i>La orientación de la pendiente</i>	21
Operaciones de vecindad extendida.....	21
<i>Cálculo del mapa de distancias</i>	21
<i>La definición de los polígonos Thiessen</i>	23
<i>El análisis de intervisibilidad</i>	23
4.2.3. Operaciones zonales.....	24
III. OBJETIVOS PEDAGÓGICOS.....	25
IV. CONCEPTOS A APRENDER.....	25
V. BIBLIOGRAFÍA.....	27

I. INTRODUCCIÓN

La asignatura «Sistemas de Información Geográfica» (SIG), del primer curso del grado de Ciencias Ambientales, supone una primera toma de contacto de los alumnos con el manejo de la información geográfica, a partir de determinadas herramientas informáticas que posibilitan el análisis territorial y medioambiental. Para que dicha información espacial pueda ser procesada por un ordenador necesita ser adaptada a un formato distinto al habitual. Se trata, por tanto, de trabajar con imágenes geográficas, pero en lugar de hacerlo en formato analógico (mapas temáticos tradicionales en papel), realizarlo en formato digital. Este tipo de imágenes digitales requieren organizar la información en modelos espaciales específicos, de los que el modelo raster es el más utilizado. En dicho modelo, el espacio estaría dividido en celdas o píxeles, de manera que cualquier información del mundo real (topografía, usos del suelo, litología, infraestructuras, etc.) se codificaría sobre este formato espacial, al sobreponer una retícula o malla cuadrada sobre el territorio. La comprensión de esta forma de organizar la información geográfica es fundamental para el conocimiento de un correcto manejo del sistema informático que la gestiona.

Por este motivo, el presente DVD intenta mostrar, en formato audiovisual, algunas de las principales características y funcionalidades básicas del modelo raster, de manera que se haga más eficaz el aprendizaje de esta materia de estudio. El mismo está subdividido en *tres partes diferenciadas*. La *primera* se centra en la exposición de *qué son y para qué sirven los SIG*, haciendo especial hincapié en las diferencias de cómo se capta la información geográfica digital, en formato raster o en formato vectorial. La *segunda parte* es la fundamental y su contenido informa al alumno de las *funcionalidades básicas de un SIG raster*, con objeto de comprender como poder acometer la tarea de resolver, por combinación de las mismas, diferentes problemas medioambientales y territoriales. Finalmente, la *tercera parte* se destina a explicar, mediante un ejemplo sencillo, la *forma de resolver un problema práctico*.

II. CONTENIDO

1. ¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica?

Es difícil dar con una definición precisa y única de este tipo de sistemas, hasta el punto que cada autor parece ofrecernos una diferente. El panorama de algunas de las definiciones, que los principales manuales sobre el tema existentes en el mercado nos proponen, podría servir para extraer los caracteres más relevantes de este concepto, relativamente reciente. Veamos alguna de las definiciones más repetidas:

- *Aronoff*: «Conjunto de procedimientos manuales o computerizados, usado para almacenar y tratar datos referenciados geográficamente».
- *Bosque Sendra*: «Tecnología aplicada a la resolución de problemas territoriales».
- *Burrough*: «Potente conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y presentar datos espaciales procedentes del mundo real».
- *Cebrián*: «Base de datos computerizada que tiene información espacial».
- *Clarke*: «Sistema computerizado para la captura, almacenamiento, recuperación, análisis y presentación de datos espaciales».
- *Felicísimo*: «Conjunto de software de ordenador, hardware y periféricos que transforman datos referenciados geográficamente en información sobre localizaciones, interacciones espaciales y relaciones geográficas de las entidades fijas o dinámicas que ocupan un espacio en los entornos naturales o construidos».
- *Goodchild*: «Sistema que utiliza una base de datos espacial para generar respuestas ante problemas de naturaleza geográfica».

- *NCGIA*: «Sistema de hardware y software, diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelización y presentación de datos, referenciados espacialmente, para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión».
- *Tomlinson*: «Sistema digital para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos, a fin de aportar material útil para las decisiones territoriales».

De todas estas definiciones, se pueden extraer una serie de rasgos que ponen el énfasis en aspectos variados que afectan a este tipo de sistemas. Por una parte, en el *tipo de tecnología empleada* (de carácter informático), en la *información que se maneja* (información geográfica, de base espacial o georreferenciada), en las *operaciones que se realizan* (captura, almacenamiento, gestión y análisis y presentación de resultados) y, finalmente, en la *problemática que se intenta resolver* (problemas territoriales y medioambientales).

Desde nuestro de vista, se podría definir a los Sistemas de Información Geográfica como a herramientas informáticas, capaces de gestionar y analizar la información georreferenciada, con vistas a la resolución de problemas de base territorial y medioambiental. El primero de los términos pondría el acento en el carácter computerizado del tratamiento de la información. Se trataría, por tanto, de la realización de operaciones automáticas, a través de los ordenadores. En segundo lugar, merece destacarse que se dirige a la gestión, análisis y modelización de información geográfica, información que se distingue por la existencia de una doble componente: temática y espacial. En este sentido, los SIG se hallan dirigidos al conocimiento y estudio de las estructuras espaciales, donde la posición relativa que ocupan los elementos de un determinado fenómeno resultan esenciales. Finalmente, los SIG aparecen como herramientas multipropósito, dirigidas a la solución de problemas en campos tan dispares como la planificación territorial, la gestión catastral, la prevención de riesgos naturales o el análisis de mercados.

2. ¿Para qué sirven los Sistemas de Información Geográfica?

La utilidad de los SIG se deriva de su capacidad para responder a cuestiones relacionadas con problemas de índole espacial. En este sentido, el SIG se convierte en un útil idóneo, preparado para ofrecer respuestas a múltiples interrogantes, vinculados con la localización y organización espacial de las actividades en el territorio. Rhind (1990) distinguía seis grandes tipos de cuestiones a las que un SIG puede dar una respuesta adecuada. Estas serían las siguientes:

- *Localización directa*. La primera y más elemental de las demandas que un SIG puede satisfacer consiste en conocer, de manera rápida y eficaz, cuales son los atributos que corresponden a una determinada entidad geográfica. Así, podríamos averiguar, con sólo apuntar el cursor sobre una ciudad (un punto de un mapa, representado en la pantalla del ordenador) la cantidad de habitantes residentes en la misma. En el caso de que se trate de la representación de un fenómeno geográfico, que varíe de forma continua en el espacio, podríamos observar la altitud de un punto concreto del mapa de elevaciones del terreno, o reconocer la presencia, en el mismo, de un uso del suelo determinado. De esta manera, responderíamos a cuestiones del tipo: ¿qué existe en un lugar concreto del territorio?
- *Localización condicionada*. Uno de los problemas geográficos más habituales es el de establecer cual es la parte del espacio que cumple con una o varias condiciones, relacionadas con un problema concreto; por ejemplo, la localización óptima de actividades en el territorio. Si se trata de investigar donde es el lugar más apropiado para localizar una industria no contaminante, en el espacio de un término municipal, deberíamos, en primer lugar, definir los criterios de localización más adecuados para el establecimiento de la industria (terreno llano, proximidad a los núcleos de poblamiento, cercanía a la ubicación de las materias primas, etc.). Los SIG contienen funciones específicas que permiten plantear este tipo de problemas, ofreciendo como solución la delimitación de la zona (o zonas) que mejor se adaptan a un conjunto de condicionamientos de carácter geográfico.
- *Tendencias*. Otro tipo de problemas es aquel relacionado con la comparación entre situa-

ciones temporales distintas, referidas al mismo territorio. Se trata de ofrecer respuestas que permitan conocer la evolución de fenómenos de carácter temporal. Esta variación de la realidad se suele realizar, contrastando dos o varias imágenes, en diferentes momentos del tiempo. Un problema de estas características podría ser la evaluación del progreso de un incendio a partir de las imágenes ofrecidas desde satélite. La rapidez de disponer de este tipo de información permite, tras su conversión a un formato que pueda ser interpretado por los SIG, realizar diagnósticos sobre la posible evolución del fuego en el futuro, introduciendo condicionantes sobre la dirección del viento, humedad de la zona, intervención humana, etc. En otros casos, la variación temporal puede medirse en períodos de tiempo más largos. El estudio de la evolución de los usos del suelo, en la periferia de una ciudad, permite, por comparación de los mapas de años distintos, extraer la tendencia de crecimiento urbano y su cotejo con las normas del planeamiento allí existentes.

- *Rutas.* Los SIG pueden dar respuesta a cuestiones tales como: ¿cuál es la ruta óptima para la construcción de una carretera, conocidas las características del territorio (litología, topografía, especies vegetales a proteger, etc.), de forma que se evalúe el camino más adecuado, desde el punto de vista de la minimización de los costos ambientales y de construcción? Otro problema semejante, aunque utilizando la red de carreteras ya existentes podría ser: ¿cuál es la ruta más adecuada, para el traslado de los niños a un colegio, en autobús, conociendo los lugares de residencia de los alumnos y la ubicación geográfica del centro escolar?
- *Pautas.* Determinadas regularidades espaciales son posibles de reconocer en el tratamiento de la información geográfica con un SIG. Así, se podría pretender establecer el patrón que define la diferenciación social de una ciudad, intentando precisar, de acuerdo a coronas (a más o menos distancia del centro) y sectores (por carreteras radiales de salida), las áreas de nivel social contrastado y las pautas de la distribución en la ciudad.
- *Modelos.* Uno de los procedimientos de gestionar la información, de mayor interés en el campo de los SIG, es el de modelizar la realidad, de acuerdo a un prototipo o paradigma, que reproduzca las bases del funcionamiento real, y permita adelantar o deducir conclusiones sobre el pasado o el futuro. Una de las técnicas de investigación más usadas es la de la simulación. Simular es representar la realidad, a partir de un modelo teórico, con una serie de mecanismos o algoritmos que imiten el comportamiento del mundo real. Este tipo de aplicaciones se viene utilizando con los SIG, como herramienta de gestión y análisis, en la reproducción de múltiples fenómenos geográficos, como la difusión de una enfermedad o contagio en el espacio, etc.

3. Los principales modelos y estructuras de datos espaciales

La base de datos espacial de un SIG no es sino la representación digital del mundo real en base a objetos discretos. La información sobre estos objetos, de naturaleza doble, temática y espacial, expresada de forma numérica, origina una colección de datos georreferenciados que actúa como modelo de la realidad. Las directrices y normas necesarias para la obtención de la información, en este formato, constituye lo que se denomina modelo de datos. Dos son los modelos básicos sobre los que se basa toda la arquitectura de los sistemas de información geográfica: el modelo raster y el modelo vectorial; veámoslos de forma separada.

3. 1. La estructura espacial del modelo raster

A principios de los años cincuenta del pasado siglo, se empezaron a utilizar ordenadores para analizar datos meteorológicos, con el objeto de dibujar, de forma automática, mapas de temperaturas y presiones. En el fondo, este procedimiento implicaba un nuevo tipo de objetos cartográficos que hacían extensibles los tradicionales puntos, líneas y polígonos (objetos discretos) a la descripción de superficies de carácter continuo.

En el modelo raster, el espacio estaría dividido en celdas (o píxeles), de manera que cualquier información del mundo real se codificaría sobre este formato espacial, al sobreponer la retícula o malla sobre el territorio. A través de un sistema de referencia apropiado, se establecería una relación biyectiva entre las celdas de una cuadrícula y un conjunto de áreas elementales de la superficie terrestre (figura 1). La información temática quedaría reflejada sobre cada una de las celdas resultantes de la división del espacio, en elementos discretos, regulares, en general, de forma cuadrada. Otros sistemas utilizan retículas triangulares o hexagonales, donde cada elemento espacial sería un triángulo equilátero o un hexágono regular. Uno de los inconvenientes de este formato es, precisamente, la elevada cantidad de objetos espaciales que se derivan de este tipo específico de subdivisión espacial. Piénsese, por ejemplo, que para cubrir un área de 9 x15 kilómetros, con una retícula cuadrada de 30 metros de lado, unidad elemental, bastante habitual, se requeriría una capa de 300 filas y 500 columnas, con un número resultante de 150.000 celdas.

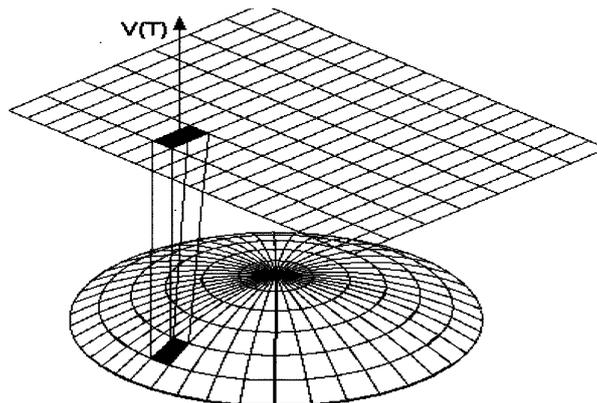


Figura 1. Relación de biyección entre las celdas de la retícula raster y las áreas de la superficie terrestre.
Fuente: García Lázaro, F. J., 2003.

El modelo raster estructura la información temática, individualmente, para cada uno de los atributos. De esta manera, la información se almacenaría en capas independientes, para cada una de las variables a representar. La figura 2 muestra la forma de organizar la información de un territorio determinado, mediante capas que recogen la variación espacial de la altitud, usos del suelo, litología, pendiente del terreno, orientación etc. Esta manera de operar implica inconvenientes, aunque también se deriven algunas ventajas. Cada base de datos, correspondiente a una variable temática, integra un elevado conjunto de números o símbolos, ordenados, de acuerdo a la teselación regular del territorio, que se multiplica, de acuerdo al número de variables a representar. Sin embargo, el modelo facilita la gestión de la información, ya que los elementos espaciales, al ser regulares y del mismo tamaño, coinciden por superposición, haciendo posible, mediante operaciones de carácter lógico o matemático, el planteamiento y resolución de problemas territoriales.

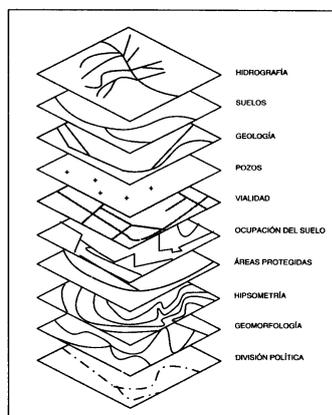


Figura 2. Capas temáticas de la información en el modelo raster.
Fuente: Barredo Cano, I., 1996.

Las entidades geográficas del mundo real quedarían representadas, de acuerdo a la correspondencia de las figuras geométricas elementales planas y el formato raster. Así, los elementos puntuales serían reemplazados por celdas individuales, los lineales por una secuencia de celdas alineadas, bien por un lado o por un vértice, y los polígonos por celdas contiguas del mismo valor temático (figura 3). Por muy pequeño que sea el píxel de la retícula utilizada, la sustitución de un punto por una celda supone un determinado error, ya que la localización del mismo queda indeterminada. Este error dependería, lógicamente, de la resolución o tamaño de la malla empleada.

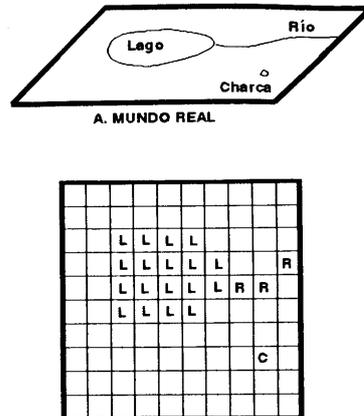


Figura 3. Representación de los objetos geográficos (puntos, líneas y polígonos) en el modelo raster .
Fuente: Gutiérrez Puebla, J. y Gould, M., 1994.

3. 2. La estructura espacial del modelo vectorial

En el modelo vectorial, la definición de los elementos geográficos que lo constituyen: puntos, líneas y polígonos, implica el posicionamiento relativo de los mismos en el espacio. La forma natural de reflejar esta situación es la geocodificación de las entidades espaciales, respecto a unos ejes de coordenadas. Los puntos, como objetos adimensionales, quedarían representados por un par de coordenadas (x, y). Las líneas y polígonos se construirían a partir de estas unidades elementales, ya que constituyen, bien una sucesión abierta de puntos, en el caso de las líneas, o una sucesión de puntos que cierra el espacio, donde las coordenadas del primero y del último de los puntos coinciden, en el caso del polígono (figura 4).

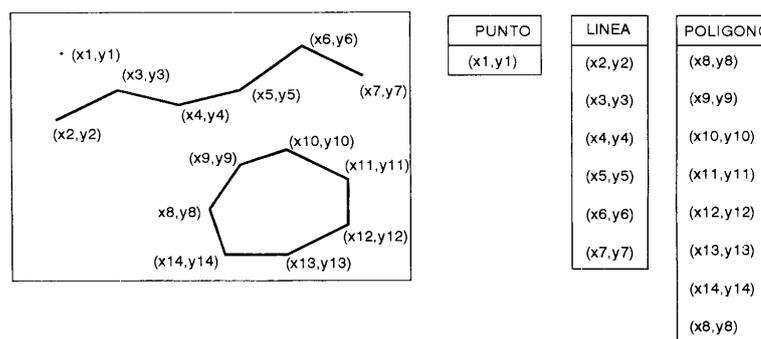


Figura 4. Representación de los elementos espaciales vectoriales (punto, línea y polígono) en un sistema de coordenadas cartesianas.

En el modelo vectorial, es importante diferenciar las estructuras de datos cartográficas y topológicas. Las primeras manifiestan, exclusivamente, la forma y posición de los objetos espaciales, por lo que la expresión de los puntos, líneas y polígonos, por sus coordenadas respectivas, es suficiente para definirlos. La estructura topológica define, bien la conectividad de los arcos en las intersecciones, bien las relaciones de contigüidad entre polígonos.

La información digital necesaria para la definición de los objetos geográficos es doble. Como hemos visto, la posición espacial está representada por las coordenadas geográficas de los elementos, bien sean puntos aislados, líneas o polígonos. Además, necesitaríamos definir, por medio de un número, el valor temático de cada uno de los elementos geométricos definidos.

4. Descripción más detallada del modelo raster

Cada una de las celdas que contiene una capa de información raster se considera como indivisible y es identificable por su número de fila y columna. Así, podemos observar en la figura 5, como quedarían organizadas e identificadas las celdas o píxeles de una capa geográfica concreta.

		Columnas								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Filas	1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9
	2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9
	3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9
	4	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9
	5	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9
	6	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5	6-6	6-7	6-8	6-9
	7	7-1	7-2	7-3	7-4	7-5	7-6	7-7	7-8	7-9

Figura 5. Identificación de las celdas por su número de fila y columna, en el modelo raster .
Fuente: Gutiérrez Puebla, J. y Gould, M., 1994

La *resolución* de la capa de información raster es la dimensión lineal de una de las celdas que la componen. Cuanto menor es la superficie de terreno representada en cada píxel mayor es la resolución y, por tanto, mayor es el número de celdas que se necesitan para representar un territorio determinado.

En cuanto a la información temática, a cada celda le corresponde un único valor. Esta información puede ser de tipo cuantitativo (como la altitud) o cualitativo (como los usos del suelo). En el primer caso, en cada píxel recogeríamos la información correspondiente a un número decimal, representativo del valor de la variable, mientras que en el segundo sería un número natural, representativo de cada categoría representada.

En formato raster, las variables se almacenan, por tanto, en capas separadas, que contienen la información correspondiente a las celdas o píxeles en que se subdivide el territorio. Así, la información correspondiente a tres variables determinadas: altitud, tipos de suelo y propiedad, en un territorio cuadrado de 750 metros de lado, representado en un formato raster de 15 filas y 15 columnas (15x15 = 225 píxeles, de 50 metros de resolución) podría ser la de la figura 6. Una vez que los datos son almacenados informáticamente en ficheros digitales, es posible el tratamiento de la información a partir de capas individuales, por medio de los SIG raster. El contenido del fichero correspondiente a la altitud (en el ejemplo presentado), almacenado en escala cuantitativa, constaría de 225 dígitos, desde el primero 92, al último 12, de forma correlativa y ordenada: 92, 91, 88, 87, ...16, 14 y 12. De la misma manera, las otras dos variables: tipos de suelo y propiedad, se almacenarían en dos ficheros, en escala cualitativa, con valores comprendidos entre el 1 y el 6 en el primer caso, y 1 y 7 en el segundo.

altitud	tipo de suelo	propiedad
92 91 88 87 75 60 39 28 26 28 27 25 23 22 21	1 1 1 1 2 2 4 4 5 5 6 6 6 5 5	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 6 6 6 6 6
93 90 85 79 68 50 31 24 23 26 27 27 25 23 22	1 1 1 2 2 2 4 5 5 6 6 6 6 6 5	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 6 6 6 6 6
95 89 79 75 58 40 26 22 23 27 31 29 27 25 24	1 1 2 2 2 2 4 5 5 6 6 6 6 6 6	2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 6 6 6 6 6
93 82 68 57 42 31 24 20 23 27 30 30 28 27 26	1 2 2 2 2 4 5 5 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 1 1 1 1 6 6 6 6 5 8
86 67 55 48 39 30 23 18 22 26 29 30 27 25 24	2 2 2 2 2 4 5 5 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2 2 6 6 6 6 6 6 6
89 54 47 41 32 28 23 17 22 26 28 30 28 29 27	2 2 2 2 4 4 5 3 5 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2 6 6 6 6 6 6 6 6
52 46 44 38 31 28 23 17 22 25 28 30 31 29 28	2 2 2 4 4 4 5 3 5 6 6 6 6 6 6 6	2 2 2 2 2 2 2 2 6 6 6 6 6 6 6 6
45 40 37 34 29 26 22 16 21 24 26 28 28 28 27	2 2 4 4 4 5 5 3 5 6 6 6 6 6 6 6	3 3 3 2 2 2 2 6 6 6 6 6 6 6 6 6
39 35 36 30 29 26 22 16 21 23 25 27 28 27 25	2 4 4 4 4 5 5 3 5 4 6 6 6 6 6 6	3 3 3 3 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
30 29 27 25 25 22 18 15 18 19 20 21 23 25 23	4 4 4 5 5 5 5 3 5 4 4 4 4 4 4 4	3 3 3 3 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
26 25 22 18 19 17 15 14 15 15 14 15 17 18 18	5 5 5 5 5 5 5 3 3 5 4 4 4 4 4 4	3 3 3 3 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
25 19 17 16 15 15 14 13 13 13 12 12 13 14 15	5 5 5 5 5 5 3 3 2 3 3 3 3 3 5 5	3 3 3 3 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
22 22 21 19 18 18 17 16 15 14 14 12 11 12	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 3 3 3 3 3	3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 7 7 7
25 26 29 27 25 26 25 26 25 22 18 14 13 12 11	5 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 3 3 3	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 7 7 7
28 30 34 31 33 35 37 34 30 27 24 20 16 14 12	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 7 7 7

Figura 6. Capas representativas de la información geográfica (altitud, tipo de suelo y propiedad)
Fuente: Keith, 1995.

Finalmente, conviene definir el concepto de orientación. La orientación de una celda es el ángulo formado por el norte geográfico con la dirección definida por las columnas de la retícula. Lo más habitual es que este ángulo sea de 0°, ya que los mapas se suelen orientar de manera que el norte aparezca en la parte superior.

4. 1. La recogida de la información digitalizada en un modelo raster

Conocida la estructura que presenta la información geográfica en el modelo raster, resulta fácil concluir sobre la dificultad de almacenar la información en un fichero digital. La gran cantidad de elementos geométricos o celdas que sirven de referencia a la recogida y formalización de la estructura reticular, con una resolución de tipo medio (piénsese en el elevado número de píxeles que se necesitaría para organizar la información, en este tipo de formato, para un territorio de 10x12 kilómetros cuadrados, con una celda cuadrada de 25 metros; el resultado sería de 400 filas y 480 columnas, con un total de 192.000 celdas a rellenar) desaconsejan cualquier tipo de entrada de los datos que no sea automatizada.

La entrada de datos en SIG raster procede, básicamente, de dos orígenes diferentes. El primero sería las imágenes obtenidas por los sensores remotos, a partir de la técnica de la Teledetección. La obtención de imágenes de satélite a partir de la energía solar reflejada sobre la cubierta terrestre permite la disponibilidad de una información geográfica, que fácilmente puede ser transformada a formato digital. La otra fuente de información procede de la digitalización de la información analógica. El mapa analógico contiene gran cantidad de datos que son fáciles de extraer de manera selectiva, originando una imagen digital a partir de la anterior. Existen diversos procedimientos de transformación de una imagen analógica a formato digital; a saber, nos vamos a referir a dos de los más importantes: la digitalización raster automática a partir de los barredores ópticos o escaners y la rasterización de datos procedentes de un formato vectorial.

Las imágenes de satélite: la técnica de la Teledetección

Se define la Teledetección como «aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre, desde sensores instalados en plataformas espaciales» (Chuvieco Salinero E., 1990). Desde esta perspectiva, esta moderna técnica de captación de imágenes terrestres excluiría a la fotografía aérea clásica, restringida a la observación de la superficie terrestre desde el avión.

Un sistema de detección espacial aprovecha la interacción energética existente entre el Sol y la Tierra. La energía solar se refleja en la superficie terrestre, en unas determinadas frecuencias, que recibidas por el satélite permiten la deducción de las características y propiedades de la cubierta reflectante. Cada zona o espacio diferencial del territorio es identificado por el contraste energético recibido, haciendo posible la reconstrucción del mosaico geográfico terrestre.

Los componentes de un sistema de Teledetección (figura 7) son los siguientes:

- Una *fuerza de energía* u origen del flujo energético, capaz de ser captada por el sensor. El foco de energía más importante es el Sol, aunque también pueda utilizarse un haz de energía emitido y detectado por el propio sensor.
- La *cubierta terrestre* a identificar, integrada por los diversos componentes geográficos: masas vegetales, suelo, agua, vías de comunicación, etc.
- Un *sensor* que capte la energía emitida por el Sol (o por él mismo).
- Un *sistema de recepción terrestre* al cual dirigir la información desde el satélite y tras su corrección sea enviada a los intérpretes.
- El *intérprete o analista* de la información recibida, bien en imágenes analógicas o digitales, para su utilización en una problemática concreta.
- El usuario final de las imágenes.

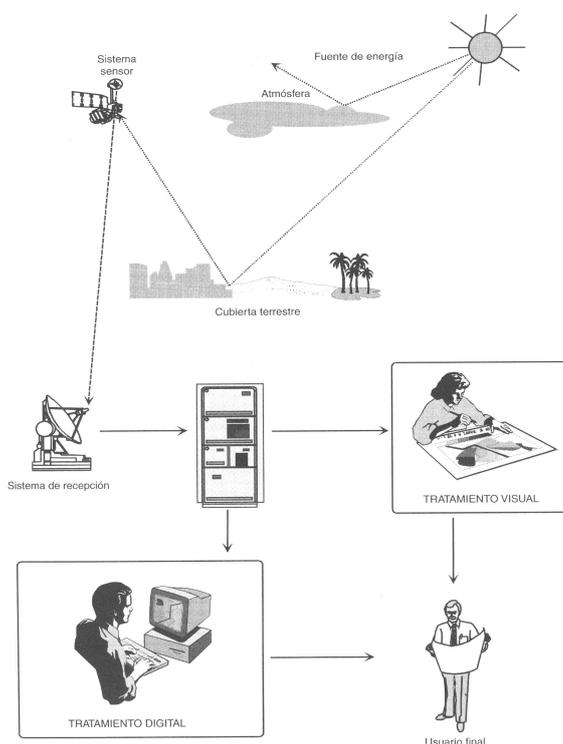


Figura 7. Componentes de un sistema de Teledetección.
Fuente: Chuvieco Salinero, E., 2002.

La discriminación de las cubiertas geográficas terrestres es posible por el diferente comportamiento frente al espectro electromagnético de la luz solar (suponiendo que éste sea el origen de la energía) de los componentes homogéneos que las integran. La energía radiante procedente del Sol se halla integrada por una variada banda de frecuencias o longitudes de onda. Entre ellas, el espectro visible no es sino una parte de la banda, aquella cuyas longitudes de onda se encuentran comprendidas entre 0.4 y 0.7 micras. Entre los valores de longitud de onda superior al mismo, se hallan los rayos infrarrojos, y las ondas de radar, radio y televisión, mientras que en los inferiores, los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Pues bien, los componentes materiales de la superficie terrestre reflejan la luz solar, según haces de energía de diferente parte del espectro. Así, la nieve refleja la mayor parte de la energía de todas las frecuencias, mientras que el agua las absorbe, en mayor proporción cuanto mayor es su valor (el de la frecuencia), mientras la vegetación se hallaría en una posición intermedia. Este comportamiento diferencial de los trozos del mosaico terrestre (vegetación, suelo desnudo de acuerdo a la litología, agua, ciudad, etc.) permitiría la reconstrucción de la imagen de un territorio determinado.

La digitalización raster automática: el barreador óptico

El barreador óptico o escaner permite obtener, fácilmente, una imagen digital a partir de un mapa analógico. La operación se realiza mediante un dispositivo que envía un haz de luz sobre el mapa a escanear, registrando sobre un sensor la intensidad de la luz reflejada e, incluso, en algunos casos, su color. El formato de medida utilizado permite, precisamente, recoger la información por celdillas, con objeto de deducir las características del territorio relativo al mapa por las propiedades de la luz reflejada.

El barreador óptico o escáner puede trabajar con una elevada resolución. En cada caso, el usuario del mismo debe seleccionar un tamaño de celda lo suficientemente pequeño, como para reproducir los detalles del mapa, y lo suficientemente grande para no almacenar la información en ficheros que consuman una memoria excesiva.

En general, la mayoría de los mapas originales no son excesivamente apropiados para la lectura directa de la información que se desea, al mezclar variables de contenido muy dispar con la propia toponimia. Esta circunstancia obliga, o aconseja, al menos, a seleccionar la información de interés en un mapa derivado, con objeto de proceder, a su escaneado específico.

La rasterización de la información digital en formato vectorial

Una de las maneras más usuales de obtener una imagen raster es mediante la operación de rasterizar (convertir a formato raster) una información existente en formato vectorial. La operación de digitalizar un mapa analógico en formato vectorial consiste en captar, normalmente mediante una tableta digitalizadora, las coordenadas de los objetos geográficos del mapa (puntos, líneas y polígonos), estableciendo un valor temático diferenciado para cada uno de los elementos. Así, la digitalización de las curvas de nivel de un mapa topográfico se realizaría al recoger, individualmente, la información de cada una de las líneas de igual altitud, mediante un número de puntos lo suficientemente elevado como para que la línea poligonal quebrada resultante se asemeje al de la curva real, asignando, posteriormente, a este elemento cartográfico, el valor de la altitud. De idéntica forma, digitalizaríamos un mapa de superficies, como el mapa litológico, extrayendo, de cada uno de los polígonos homogéneos existentes en el territorio, su forma (por las coordenadas de la superficie cerrada del polígono) y su valor temático (categoría del tipo de sustrato litológico del mapa).

La operación de rasterización conlleva dos fases diferenciadas. La primera consiste en preparar una retícula vacía, donde pueda integrarse el territorio a representar, para poder recoger el resultado de la intersección de la información en formato vectorial, georreferenciada por las coordenadas, y la retícula raster. Para que esta operación pueda realizarse de manera correcta, se debe, en primer lugar, organizar los ejes de coordenadas vectoriales y la rejilla raster de manera semejante, de forma que el origen de coordenadas del sistema vectorial coincida con el origen de coordenadas del sistema raster (arriba y a la izquierda).

La segunda fase consistiría en verter la información vectorial sobre la rejilla, transformando el resultado de un formato a otro. Así, los puntos se transformarían en celdas individuales, las líneas abiertas en una sucesión de píxeles, unidos por los lados o los vértices, y, finalmente, los polígonos en zonas o sucesión de celdas contiguas, con el mismo valor temático en cada una de ellas.

4. 2. Funcionalidades básicas de los Sistemas de Información Geográfica

Los procedimientos de análisis, existentes en los SIG raster, aparecen condicionados por la peculiar estructura de su modelo de organización de la información. La especial conexión de las componentes temática y espacial es la causa de que, en las operaciones a realizar en este tipo de modelos, se analicen los datos de acuerdo a su representación espacial. Debemos tener muy presente que cada variable está constituida por una capa individual, donde la expresión de su valor temático está ligada a la posición de cada celda o píxel.

Acorde a esta manera de funcionar, podemos diferenciar un conjunto de procedimientos analíticos, agrupados por la similitud del método de examen y tratamiento de los datos. Un primer grupo de operaciones tiene que ver con el contenido específico de cada píxel, sin tener en cuenta los que le rodean. Este tipo de procedimientos, conocidos como operaciones locales, pueden realizarse sobre una sola capa (reclasificar los valores temáticos del mapa) o integrar varias capas (superposición algebraica de las mismas). Un segundo grupo de operaciones realizan cálculos para cada píxel de acuerdo al valor de los que existen en su proximidad. Este nuevo tipo de procedimientos, conocidos como operaciones de vecindad, tienen en cuenta los valores temáticos de las celdas más cercanas (cálculo de pendientes) o de otras más alejadas (cálculo de distancias). Finalmente, otro grupo de operaciones, denominadas zonales, se hallan relacionadas con la geometría de los objetos geográficos (zonas) a diferenciar en este tipo de formato espacial, mediante el reconocimiento de los mismos (puntos líneas y polígonos) y del cálculo de sus características de forma y tamaño.

4. 2. 1. Operaciones locales de los SIG raster

Las operaciones locales son aquellas que se realizan, considerando, aisladamente, cada píxel, sin tener en cuenta la posición espacial que ocupan unas celdas respecto de las otras. Desde este punto de vista, este tipo de operaciones no tienen en cuenta relaciones entre unas posiciones y otras, por lo cual no tienen carácter espacial, salvo en lo que se refiere a la distribución de los distintos valores de la variable temática.

Se pueden diferenciar dos tipos de operaciones: las que se realizan a partir de una única imagen para obtener otra nueva (reclasificación) y las que a partir de dos o más imágenes se obtiene una tercera (superposición).

Operaciones de reclasificación

Las operaciones de reclasificación transforman los valores de una capa o fichero de información en una nueva imagen, bien recodificando los valores o categorías existentes, bien concentrando las categorías presentes en un número más reducido (variables cualitativas), bien agrupando los valores existentes en intervalos (variables cuantitativas), bien modificando los valores de las celdas por la operación algebraica de una constante o la aplicación de una función determinada (trigonométrica, etc.). Veamos, separadamente, cada una de estas operaciones.

- 1 La *operación de recodificación* consiste en sustituir los códigos existentes, como valores de los píxeles, por otros nuevos, de acuerdo a un criterio que reorganice los mismos. Así, supongamos que en un determinado territorio, como puede apreciarse en la figura 8, aparecen, exclusivamente, las categorías correspondientes a los usos del suelo 34, 56, 58, 91 y 97 y deseamos generar un nuevo mapa que sustituya estos valores, de forma reorganizada, por los primeros números naturales, 1, 2, 3, 4 y 5. La operación de transformación consistiría en modificar los valores de 34 por 1, de 56 por 2, de 58 por 3, de 91 por 4 y de 97 por 5, obteniendo una nueva imagen, correspondiente a los valores de 1 a 5.

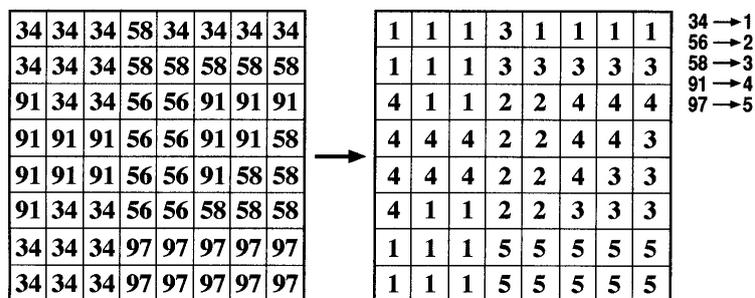


Figura 8. Codificación de una imagen raster.

2. La *operación de agregación* de categorías consiste en la agrupación de varias clases en una nueva, de manera que el resultado sea un número de categorías inferior al inicialmente existente. A modo de ejemplo, exponemos la agregación de las 10 categorías de los usos del suelo de una zona concreta, agrupando las categorías inicialmente existentes en únicamente 7, de acuerdo a los siguientes criterios:

Categorías antiguas	Categorías nuevas
1. erial	1. erial
2. regadío	2. cultivos de regadío
3. barbecho	3. cultivos de secano
4. viñedo	4. bosque
5. chopos	5. matorral
6. pinos	6. pastizales
7. encinas	7. núcleos urbanos
8. matorral	
9. pastizales	
10. núcleos urbanos	

De tal manera que se registre la siguiente asignación de los antiguos valores a los nuevos:

Antiguos	Nuevos
1	1
2	2
3 y 4	3
5, 6 y 7	4
8	5
9	6
10	7

3. En la reclasificación de una imagen, correspondiente a una variable cuantitativa, la agrupación se realizaría por intervalos. En el caso de la capa de información de los valores altitudinales del territorio, podríamos, en la imagen del modelo digital del terreno, reclasificar la imagen inicial en siete intervalos con el siguiente criterio:

Intervalos iniciales	Valores finales
<400 m	1
400-500 m	2
500-600 m	3
600-700 m	4
700-800 m	5
800-900 m	6
>900 m	7

La nueva imagen contendría una variable categórica de siete clases, cuyos valores serían los números naturales del 1 al 7.

4. Otro tipo de reclasificación consiste en *operar los valores de una capa determinada por una constante*. Esta operación puede consistir en la suma o el producto de una cantidad determinada a los valores de las celdas de una imagen concreta. Esta operación sería obligatorio realizarla si intentáramos transformar los valores altitudinales de un modelo digital de elevaciones de unidades en pies a metros. La operación consistiría en multiplicar los valores de cada píxel por la constante 0.3048, correspondiente al número de metros de un pie.
5. La *aplicación de una función* determinada (trigonométrica, logarítmica, etc.) a los valores de una capa fuente originaría un mapa derivado del anterior, de acuerdo a la operación realizada (seno, coseno, tangente, logaritmo neperiano, etc.).

Operaciones de superposición

La superposición lógica

En este tipo de superposición, los mapas iniciales deben ser imágenes binarias, con valores de 0 y/o 1. Las celdas con valor igual a la unidad reflejan la satisfacción o cumplimiento de una determinada condición, mientras que las que tienen valor nulo no. Por ejemplo, en la reclasificación de la figura 9, los píxeles con valor 1 representan el espacio que cumple el requisito de que la pendiente es inferior al 10%, condición que se considera fundamental, en este ejemplo, de cara a la implantación de la función industrial.

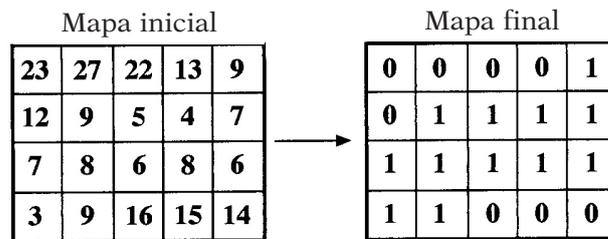


Figura 9. Operación de reclasificación de categorías, en una imagen raster

La *superposición lógica (Y LÓGICO)*, origina la intersección de las áreas del territorio que cumplen dos condiciones a la vez. El producto de dos capas de información, expresadas con variables de tipo lógico, origina una nueva imagen, donde los valores iguales a la unidad cumplen ambas condiciones. En la figura 10, se ha expresado la operación (Y LÓGICO) a partir de dos imágenes que cumplen, cada una de ellas, una condición que se considera básica para la ubicación de la industria: la localización óptima respecto a los factores productivos (la distancia 1 supone que se satisface esta condición, mientras que el valor 0 no) y que la pendiente sea inferior al 10% (valores 1 y 0). El producto de ambas imágenes genera una nueva capa que cumple las dos condiciones. Solamente en las celdas, en las que ambas imágenes poseyeran el valor 1, el producto sería igual a la unidad.

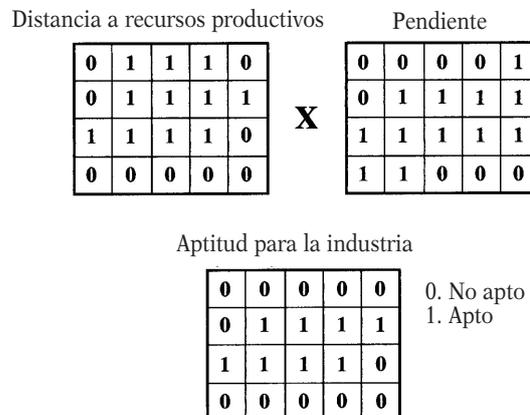


Figura 10. Operación de superposición de capas (Y LÓGICO), en una imagen raster.

Por su parte, la *superposición lógica (O LÓGICO)* define las zonas de un territorio que cumplen una de dos condiciones a la vez. La figura 11 muestra, en el mismo ejemplo anterior, mediante la suma y reclasificación de las capas origen de cada condición, como obtener la solución deseada.

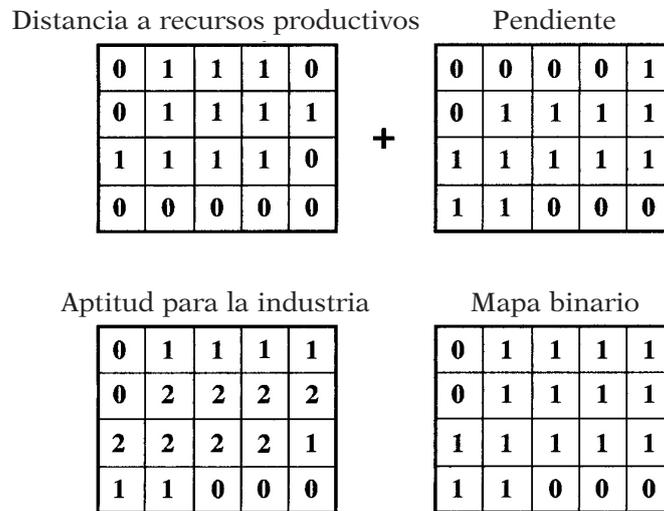


Figura 11. Operación de superposición de capas (O LÓGICO), en una imagen raster.

La superposición algebraica

La superposición algebraica supone la obtención de una nueva capa de información, mediante operaciones de suma, resta, multiplicación, división, etc. Así, en la figura 12, se expresa, a modo de ejemplo, como obtener el incremento de población, por diferencia, en cada píxel, entre los habitantes residentes en los años 1990 (una de las capas) y 1980 (otra de las capas).

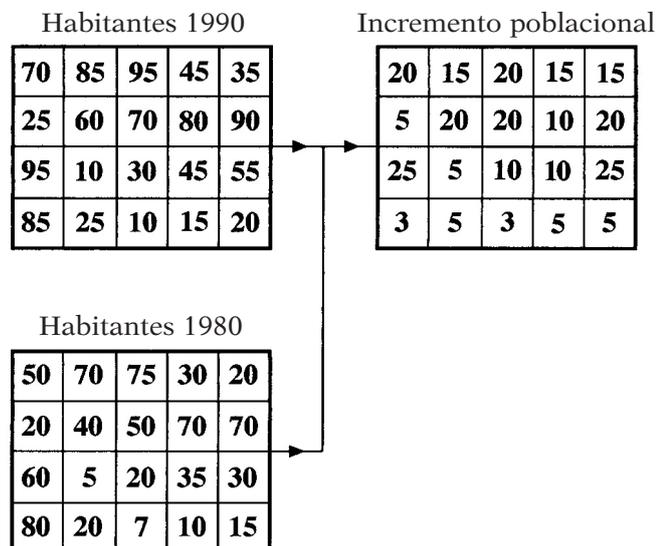


Figura 12. Superposición algebraica de capas (resta), en un SIG raster.

En general, es posible la superposición de mapas de acuerdo al denominado *álgebra de mapas* (Berry, J. K., 1987), que consiste en la obtención de una nueva imagen raster, a partir de un conjunto de operaciones algebraicas múltiples, que relacionen entre sí las capas fuente originales a través de operadores algebraicos y valores constantes.

Intersección o cruce de mapas nominales u ordinales

El cruce de categorías de dos imágenes, cuyos valores temáticos pertenezcan a una escala nominal u ordinal, está dirigido a conseguir, en una nueva capa de información, los posibles cruces de categorías de las capas de origen. Entre las operaciones que permite realizar este procedimiento de análisis, una de las más interesantes es la realización de estudios dinámicos, al poder expresar, en una nueva capa de información, los cambios originados, en el territorio, entre dos fechas determinadas. La figura 13 recoge la aplicación de esta operación al estudio de los cambios de usos del suelo (solo se indican tres usos del suelo: agrícola, urbano e industrial, para facilitar la comprensión del método) entre las fechas 1950 y 1990. Los posibles cruces entre las categorías de la primera y la segunda imagen serían 9 (3x3). En el caso que nos ocupa, solo aparecen seis de las nueve categorías posibles, siendo las clases 4, 5 y 6 las que muestran los cambios acaecidos entre 1950 y 1990 (de agrícola a urbano, de agrícola a industrial y de industrial a urbano).

Posibles cruces	Nuevas categorías
primero agrícola después agrícola	1
primero urbano después urbano	2
primero industrial después industrial	3
primero agrícola después urbano	4
primero agrícola después industrial	5
primero industrial después urbano	6
primero industrial después agrícola	7
primero urbano después agrícola	8
primero urbano después industrial	9

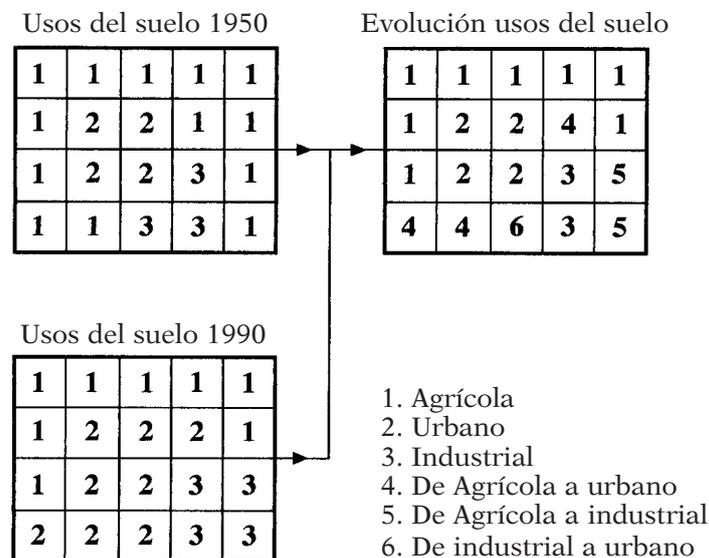


Figura 13. Operación de cruce de categorías en un SIG raster.

Enmascarado de mapas

El enmascarado de mapas consiste en un tipo de superposición, en el que uno de los mapas se coloca encima de otro, haciendo desaparecer los valores existentes en el inferior, siempre que los valores del superior sean no nulos, o, dicho de otro modo, diferentes de cero. De esta manera, la capa superior actúa a modo de máscara.

4. 2. 2. Las operaciones de vecindad en un SIG raster

Son operaciones destinadas a expresar las relaciones existentes entre una o varias celdas de origen y el resto del territorio. Constituyen, por tanto, operaciones dedicadas a manifestar las relaciones espaciales de cada píxel con el entorno más o menos próximo.

Operaciones de vecindad inmediata

Las operaciones de vecindad inmediata calculan, para cada celda, un determinado valor, en función de las celdas más próximas. Lo más frecuente consiste en utilizar la ventana de 3x3 que rodea a un píxel determinado, con lo que se considerarían las ocho celdas inmediatas. En otros casos, podría emplearse la ventana de 5x5, incluso, en casos más extremos de 7x7 (figura 14). Entre las operaciones más frecuentes, vamos a referirnos al cálculo del filtrado, la pendiente y la orientación del territorio.

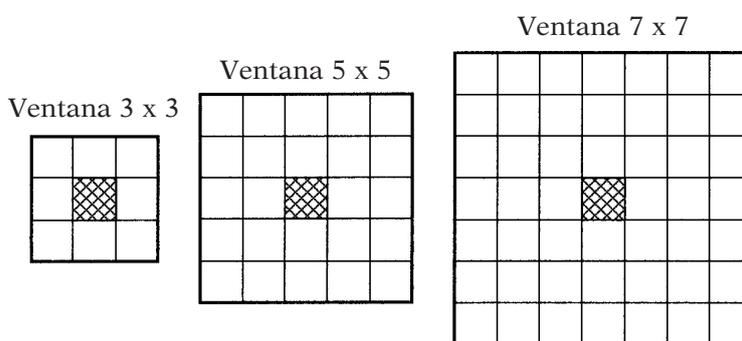


Figura 14. Ventanas que destacan los elementos de proximidad a un píxel (de 3x3, 5x5 y 7x7).

El filtrado de mapas

La operación de filtrado consiste en sustituir el valor del píxel central por el de la media (ponderada o no) de los ocho valores que le rodean. También se pueden utilizar otras medidas de tendencia central como la moda (valor que más veces se repitiera de los ocho) o la mediana (valor que dejara el mismo número de valores por encima o por debajo).

El resultado de la aplicación de la media es un *suavizado* de los valores originales. Si la media se calcula otorgando el mismo peso (0.11) a todas las celdas, el suavizado se denomina intenso, ya que la ponderación de la celda central sería igual al de las celdas adyacentes.

0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11

En el caso de que consideráramos destacar, en mayor medida, el valor de la celda central, *el suavizado sería menos intenso*. Podríamos, por ejemplo, ponderar a la celda central con un peso cuatro veces y medio superior al de las celdas contiguas, con lo que aplicaríamos un suavizado con un peso de 0.36 para la primera y de 0.08 para el resto. Puede observarse, que realizamos la operación de manera que la suma total de los pesos sea la unidad, con lo que la aplicación de la ponderación resulta simplificada.

0.08	0.08	0.08
0.08	0.36	0.08
0.08	0.08	0.08

Otra posibilidad consistiría en *realzar* el valor central respecto a los que lo rodean. En este caso, se trataría de dar valores negativos a los pesos de las celdas limítrofes, con lo que conseguiríamos destacar el valor de cada píxel respecto a los más cercanos. Una solución podría ser la de dar un peso negativo de -0.10 a las celdas que rodean a la central y de 1.80 a ésta última:

-0.10	-0.10	-0.10
-0.10	1.80	-0.10
-0.10	-0.10	-0.10

En la figura 15 puede apreciarse el resultado de aplicar a la imagen de partida el filtrado, en las tres posibilidades contempladas: suavizado intenso, suavizado débil y realce.

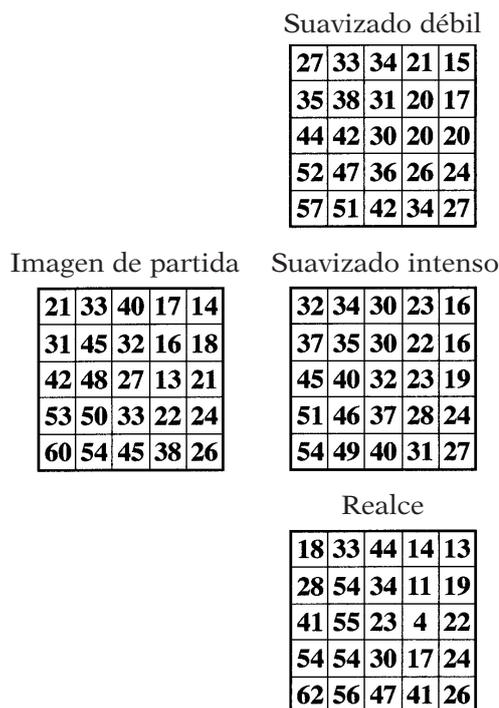


Figura 15. Resultado de aplicar la técnica de filtrado a una imagen raster, según un suavizado suave, suavizado débil y realce.

La aplicación de la moda, como técnica de filtrado, es utilizada cuando queremos hacer desaparecer de una imagen concreta aquellos valores raros, que definen puntos singulares no deseados. La aplicación de este procedimiento tiende a homogeneizar el espacio, ya que sustituye cada valor por el que más veces se repita de los ocho restantes que lo rodean.

El cálculo de la pendiente

Una variable de gran interés es la pendiente topográfica. Se define como tal a la inclinación del terreno respecto a un plano horizontal. El cálculo resulta sencillo, a partir del desnivel vertical del terreno y de la distancia horizontal entre dos puntos del espacio (figura 16). La pendiente se mide en grados o porcentajes. El valor porcentual se expresa en la relación del desnivel y la distancia horizontal expresada en tanto por ciento. Así, una pendiente de 30° se corresponderá con un valor porcentual del 50%, mientras que otra del 45° será equivalente a un porcentaje del 100 % (al ser iguales, para este ángulo, los valores del desnivel y la distancia horizontal). En consecuencia, las pendientes superiores al cien por cien exceden los 45° . En realidad, puede considerarse que el valor de la pendiente en porcentaje coincide con el de la tangente trigonométrica del ángulo de desnivel, multiplicada por cien.

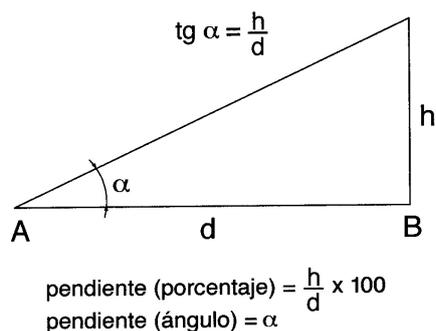


Figura 16. Cálculo de la pendiente, entre dos puntos del terreno.

Una de las operaciones de vecindad más usuales es la construcción de un mapa de pendientes, a partir del modelo digital de elevaciones o mapa de altitudes. Entre las posibles soluciones existentes para el cálculo de pendientes, la más utilizada es aquella que obtiene los valores de desnivel relativo existentes entre cada celda con las ocho que la rodean, o bien con las cuatro situadas justo encima o abajo o la derecha e izquierda, que son contiguas, según uno de los lados. La pendiente individual de cada uno de los casos se calcula, teniendo en cuenta las distancias horizontales y las diferencias de altitud correspondientes.

La definición de la pendiente a partir de los ocho valores obtenidos puede ser múltiple:

- Tomar el valor máximo de los ocho (o cuatro) valores de la pendiente calculada.
- Utilizar el valor medio de los ocho (o cuatro) valores de la pendiente calculada.
- Obtener la pendiente del plano que mejor se ajusta a los altitudes de los nueve puntos (el central y los ocho limítrofes). Para ello, se calculan los parámetros del citado plano por el método del ajuste de los mínimos cuadrados, de manera que los cuadrados de las diferencias entre los valores reales y los definidos por el plano sean mínimos, lo que significa encontrar el plano de regresión ajustado a los nueve puntos.

En el ejemplo de la figura 17, se ha optado por el cálculo de la pendiente a partir de los ocho puntos que rodean al píxel central, seleccionando el máximo valor de la pendiente hallada. Así, si la resolución de cada píxel es de 100 metros, las distancias horizontales entre el píxel central y los ocho del entorno próximo serían de 100 y 140 metros. Si hallamos los ocho valores posibles de la pendiente, expresados en porcentajes (relación entre la variación de altitudes y la distancia horizontal, multiplicada por cien), el mayor valor resultante sería de 42.9%, que constituiría el valor de la pendiente para la celda central. La repetición de esta operación, para todas las celdas que integran una determinada imagen, nos suministraría una nueva capa de información, representativa del valor de la pendiente en un territorio determinado. El mapa de pendientes podría representarse en valores porcentuales o en grados de inclinación.

Altitudes			Diferencias			Distancias		
270	260	250	40	30	20	140	100	140
240	230	230	10		0	100		100
210	200	170	20	30	60	140	100	140
Pendientes			Pendientes en el centro					
28.6	30.0	14.3				42.9		
10.0		0.0						
14.3	30.0	42.9						

Figura 17. Cálculo de pendientes, por elección del mayor valor de las ocho celdas más próximas.

La orientación de la pendiente

La orientación de una celda hace referencia al ángulo de inclinación del plano de máxima pendiente, respecto a un punto cardinal de referencia, que suele ser el norte. Así, de acuerdo a la rosa de los vientos, la orientación norte sería de 0°, la nordeste de 45°, la del este vendría representada por un ángulo de 90°, la sureste por 145°, la del sur por 180°, la suroeste por 225°, la del oeste por 270° y la noroeste por 315°. En la figura 18, se muestra, en un ejemplo práctico, los grados de la orientación y la posición de los píxeles.

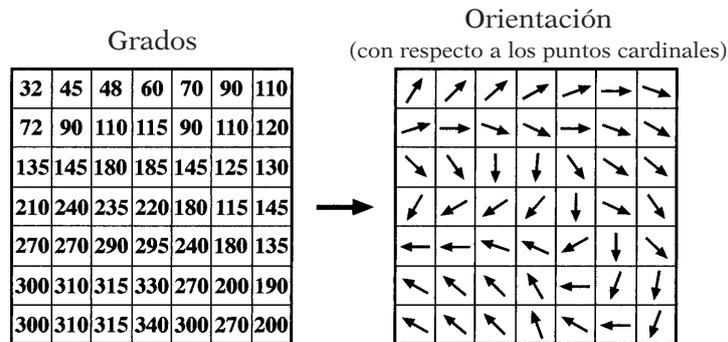


Figura 18. Grados de orientación y posición de los píxeles.

El valor de la orientación de la pendiente, de acuerdo al tercer de los procedimientos aplicados en el apartado anterior, sería:

$$\text{orientación} = \tan^{-1} \frac{c}{b}$$

No cabe duda, que la posición de solana o umbría constituye un elemento importante de cara a la insolación recibida. La cantidad de insolación depende, tanto de la orientación del terreno como del valor de la pendiente. En general, en el hemisferio norte, los valores de la pendiente disminuyen la insolación en la zona de umbría, orientada al norte, mientras que la aumentan en las de solana, orientadas al sur. El coeficiente de insolación, de valor 1 con pendiente nula, varía según los valores de ambas variables (orientación y pendiente).

Operaciones de vecindad extendida

Las operaciones de vecindad extendida manifiestan la relación espacial de un conjunto de celdas de referencia respecto a otras, que ya no tienen porqué ser contiguas, como en el caso anterior.

Cálculo del mapa de distancias

La medición de la distancia entre diferentes elementos geográficos constituye una de las operaciones de mayor interés a la hora de analizar la estructura espacial de un determinado territorio. El concepto de distancia, expresado de manera general, coincide con la denominada *distancia de Minkowski*, que referida a un espacio de q dimensiones sería:

$$d_{i,j} = \sqrt[q]{\sum_{k=1}^p [x_{i,k} - x_{j,k}]^q}$$

La *distancia euclidiana* se refiere a la mínima distancia entre dos puntos, es decir a la distancia en línea recta. En este caso, referido a un espacio de dos dimensiones, la fórmula anterior quedaría establecida de la siguiente manera:

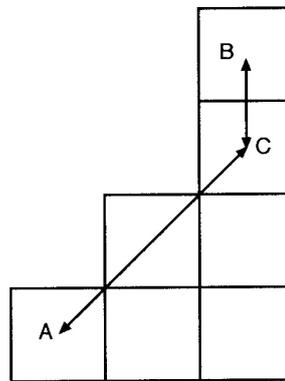
$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^2 (x_{i,k} - x_{j,k})^2}$$

Como puede deducirse de los valores que se muestran, el valor representativo de cada píxel se obtendría de la distancia existente entre los centros de cada celda y la de referencia. Estos valores serían, de acuerdo al teorema de Pitágoras:

$$distancia = \sqrt{d_f^2 + d_c^2}$$

siendo d_f la distancia entre filas y d_c la distancia entre columnas.

Este valor de la distancia no coincide con la denominada distancia raster. La distancia raster se establece, midiendo la dimensión existente en unidades de celdas. Si la distancia se establece entre dos elementos de la misma fila o columna, la distancia raster coincidiría con el número de píxeles que los separan multiplicado por el valor de la resolución de la celda. En el caso de que las celdas se hallen en distinta fila y columna, el camino raster más corto es el que seguiría la dirección bien de filas, bien de columnas, bien de diagonales. Así, en la figura 19, puede apreciarse como se obtendría la distancia raster, entre las celdas A y B.



Distancia raster $AB = d_{AC} + d_{CB}$

d_{AC} = distancia por diagonales

d_{CB} = distancia por columnas

Figura 19. Distancia raster entre las celdas A y B.

A modo de ejemplo, hemos representado, en el mapa de la figura 20, la distancia euclidiana de cada celda del territorio, respecto a la celda superior izquierda, suponiendo que la resolución de cada píxel sea de 100 metros. Así, la distancia, desde el origen superior izquierdo, correspondiente a la celda de la tercera fila y quinta columna sería:

$$distancia = \sqrt{400^2 + 200^2} = 447,2$$

0	100.0	200.0	300.0	400.0
100.0	141.4	223.6	316.2	412.3
200.0	223.6	282.8	360.5	447.2
300.0	316.2	360.5	424.2	500.0
400.0	412.3	447.2	500.0	565.7

Figura 20. Cálculo de la distancia, respecto al píxel superior izquierda.

La definición de los polígonos Thiessen

La generación de polígonos Thiessen consiste en la asignación de las celdas de un determinado territorio a una serie de puntos (en realidad celdas aisladas), previamente fijados, de manera que esta clasificación se realice por proximidad. De esta manera, el total de los píxeles se agruparían en áreas de influencia de los puntos de partida. El resultado final se conoce como *teselación Voronoi* y tiene la propiedad de que los límites de los polígonos son equidistantes de los centros originales.

A continuación, mostramos la aplicación de la operación a una serie de puntos y el resultado, expresado como áreas homogéneas de la proximidad a cada uno de ellos (figura 21).

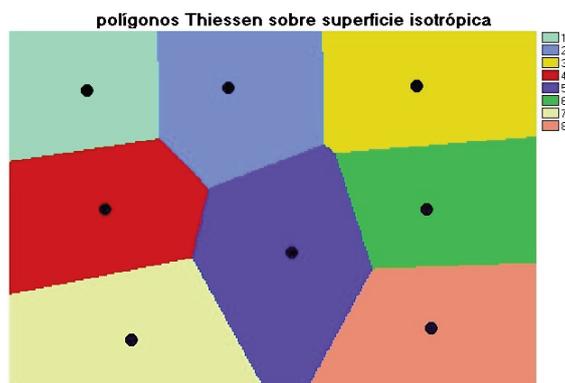


Figura 21. Cálculo de los polígonos Thiessen en una superficie isotrópica.

Los polígonos Thiessen se aplican en el estudio de áreas de mercado o centros de influencia de servicios (zonas sanitarias o escolares, bibliotecas, etc.), conocidos los centros que prestan el servicio de que se trate. Las áreas resultantes pueden ser interpretadas como las áreas de influencia de cada centro, siempre que se considere idéntico el peso de atracción de los mismos. En el caso de disponer, en otra capa, de información sobre la distribución de la población, se podría calcular la demanda potencial de cada centro.

El análisis de intervisibilidad

El análisis de intervisibilidad trata de diferenciar aquellas celdas que son visibles de las que no lo son, teniendo en cuenta la topografía del territorio, al ser observado el mismo desde una o varias celdas de vigilancia o inspección (figura 22). Se define como cuenca visual, precisamente, la zona visible desde un punto, línea o superficie de referencia.

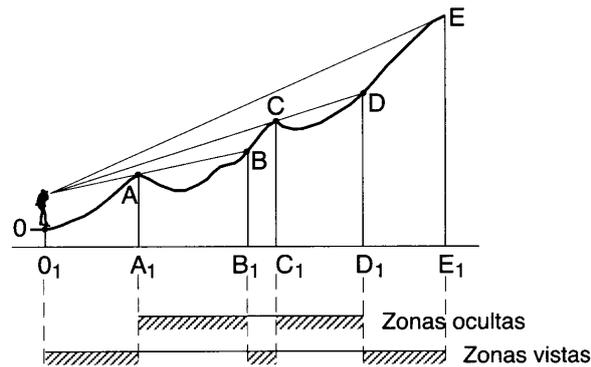


Figura 22. Delimitación de la cuenca visual.

La visibilidad depende de varios factores:

- *La superficie topográfica*, que determina que determinados puntos sean ocultados al observador si delante de los mismos existen puntos del territorio de una altitud superior.
- *La presencia de elementos que actúen a modo de pantallas*, como casas, árboles, que impidan la visión de las áreas a observar.
- *La altura del observador*. Así, no es lo mismo otear el paisaje desde la altura de una persona de 1.80 metros, que desde una torreta de 25 metros.

Uno de los campos de aplicación del análisis de intervisibilidad es el estudio del paisaje. El enfoque del paisaje visual se orienta hacia el sentido estético o de percepción del medio, al situarse el observador dentro del propio territorio. La definición previa de zonas de calidad paisajística, positiva o negativa, permite realizar el planteamiento de la evaluación de la calidad visual, desde áreas que habitualmente son habitadas o, simplemente, visitadas por personas. Se denominan a estas áreas miradores humanos, como pueden ser los núcleos urbanos, las carreteras, u otros espacios frecuentados por personas. La valoración del paisaje se realiza teniendo presente los aspectos positivos del paisaje observado (geomorfología, tipo y desarrollo de la vegetación, presencia de agua, etc) o negativos (presencia de industrias contaminantes, urbanizaciones de estética desafortunada, vertidos y basureros, etc), así como la distancia, que multiplica el efecto positivo o negativo de la percepción.

4. 2. 3. Operaciones zonales

Finalmente, nos referiremos a las operaciones zonales como aquellas que identifican áreas contiguas del territorio con el mismo valor temático. La determinación de zonas resulta del mayor interés en los estudios territoriales, ya que permite individualizar trozos del espacio que cumplan determinadas condiciones, en los que poder efectuar mediciones sobre su forma y dimensiones. Un ejemplo sencillo puede facilitar la interpretación de este tipo de operaciones. Supongamos que deseamos delimitar, en un espacio geográfico concreto, el área óptima desde el punto de vista de la urbanización residencial. La consideración de un conjunto de variables de referencia (distancia al núcleo urbano preexistente, pendiente del terreno, distancia a la carretera, paisaje agradable, distancia a determinados servicios, etc.) puede servir para definir las celdas del territorio que cumplan de manera más efectiva las condiciones expuestas. Sin embargo, resulta obvio, que la necesidad de disponer de una parcela (o parcelas) de determinado tamaño es fundamental a la hora de suponer el problema planteado como resuelto.

La figura 23 muestra la forma de zonificar, mediante un SIG, el espacio. La identificación de zonas o regiones supone la delimitación de áreas homogéneas desde el punto de vista temático, que manifiesten, además, la contigüidad de sus píxeles. En este caso concreto, podemos observar la existencia de tres valores temáticos diferentes, pero de cinco zonas distintas.

Valores temáticos					Zonas resultantes				
1	1	2	2	1	1	1	2	2	4
1	1	2	1	1	1	1	2	4	4
3	3	3	1	1	3	3	3	4	4
3	2	2	2	1	3	5	5	5	4
3	2	2	2	1	3	5	5	5	4

Figura 23. Definición de zonas: áreas contiguas de idéntico valor temático.

Una vez que las zonas han sido identificadas y codificadas, es posible realizar operaciones de medición espacial de algunos de sus atributos geométricos: superficie, perímetro, forma, etc.

III. OBJETIVOS PEDAGÓGICOS

- Conocer el concepto básico de los SIG, como herramientas destinadas a la gestión de los problemas medioambientales y territoriales.
- Conocer los principales campos temáticos donde este tipo de herramientas informáticas se aplican.
- Comprender la organización básica subyacente en las imágenes digitales de base espacial.
- Facilitar el aprendizaje de las principales operaciones básicas de los SIG raster en el manejo de las imágenes digitales territorializadas.
- Comprender la forma de integrar las distintas operaciones específicas de los SIG raster, mediante el planteamiento y resolución de un problema concreto.

IV. CONCEPTOS A APREHENDER

Análisis de intervisibilidad: Función propia de los SIG que trata de diferenciar aquellas áreas que son visibles de las que no lo son, teniendo en cuenta la topografía del territorio, al ser observado el mismo desde un hipotético lugar de vigilancia o inspección. Se define como cuenca visual, precisamente, la zona visible desde un punto, línea o superficie de referencia.

Análisis de proximidad: Función propia de los SIG que trata de diferenciar las áreas que envuelven una localización determinada.

Barredor óptico (escáner): Periférico que permite obtener fácilmente una imagen digital a partir de un mapa analógico. La operación se realiza mediante un dispositivo que envía un haz de luz sobre el mapa a escanear, registrando sobre un sensor la intensidad de la luz reflejada e, incluso, en algunos casos, su color. El formato de medida utilizado permite, precisamente, recoger la información por celdillas, con objeto de deducir las características del territorio relativo al mapa por las propiedades de la luz reflejada.

Buffer: Palabra del argot propio de los SIG que indica la zona de proximidad existente a un determinado objeto geográfico.

Capa: Conjunto de datos espaciales asociados a un contenido temático común.

Celda (píxel): Elemento espacial básico de recogida de la información que se utiliza en el modelo raster. Su forma más habitual es cuadrada.

Filtrado de mapas (raster): Operación que consiste en sustituir el valor del píxel central por

el de la media (ponderada o no) de los ocho valores que la rodean. También se pueden utilizar otras medidas de tendencia central como la moda (valor que más veces se repitiera de los ocho) o la mediana (valor que dejara el mismo número de valores por encima o por debajo).

Fotografía aérea: Fotografía de la superficie de la Tierra, tomada desde un avión.

Mapa booleano: Mapa digital raster con solo valores posibles de 0 y 1.

Mapa raster: Representación cartográfica de la superficie terrestre, obtenida como contraste de los valores de los píxeles o celdas, en que se ha subdividido el territorio, en el modelo raster. La manera más habitual de realizarlo es la asignación de un código de color distinto para cada valor. El aspecto observado en el mapa, representativo de cada variable, depende de la resolución y de las categorías a reproducir. Si la resolución es alta (pequeño valor de la dimensión de cada celda), la continuidad de la imagen es superior y puede que no se perciba el formato raster subyacente a la misma.

Modelo raster: Sistema de referencia espacial que establece una relación biyectiva entre las celdas de una cuadrícula y un conjunto de áreas elementales de la superficie terrestre. La información temática quedaría reflejada sobre cada una de las celdas resultantes de la división del espacio, en elementos discretos, regulares, en general, de forma cuadrada. El modelo raster estructura la información temática, individualmente, para cada uno de los atributos. De esta manera, la información se almacenaría en capas independientes, para cada una de las variables a representar.

Modelo vectorial: Sistema de referencia espacial, donde los elementos u objetos geográficos quedan representados por puntos, líneas y polígonos. La forma natural de reflejar esta situación es la geocodificación de las entidades espaciales, respecto a unos ejes de coordenadas. Los puntos, como objetos adimensionales, quedarían representados por un par de coordenadas (x, y). Las líneas y polígonos se construirían a partir de estas unidades elementales, ya que constituyen, bien una sucesión abierta de puntos, en el caso de las líneas, o una sucesión de puntos que cierran el espacio, donde las coordenadas del primero y del último de los puntos coinciden, en el caso del polígono. Las relaciones existentes entre ellos quedan determinadas por la topología y sus características temáticas por los atributos que les corresponden.

Operaciones de vecindad (raster): Operaciones destinadas a expresar las relaciones existentes entre una o varias celdas de origen y el resto del territorio. Constituyen, por tanto, operaciones dedicadas a manifestar las relaciones espaciales de cada píxel con el entorno más o menos próximo.

Operaciones locales (raster): Son aquellas que se realizan considerando, aisladamente, cada píxel, sin tener en cuenta la posición espacial que ocupan unas celdas respecto de las otras.

Operaciones zonales (raster): Son aquellas que identifican áreas contiguas del territorio con el mismo valor temático.

Orientación de la pendiente: Orientación de una celda que hace referencia al ángulo de inclinación del plano de máxima pendiente, respecto a un punto cardinal de referencia, que suele ser el norte. Así, de acuerdo a la rosa de los vientos, la orientación norte sería de 0°, la nordeste de 45°, la del este vendría representada por un ángulo de 90°, la sureste por 145°, la del sur por 180°, la suroeste por 225°, la del oeste por 270° y la noroeste por 315°.

Pendiente topográfica: Inclinación del terreno respecto a un plano horizontal. El cálculo resulta sencillo, a partir del desnivel vertical del terreno y de la distancia horizontal entre dos puntos del espacio. La pendiente se mide en grados o porcentajes. El valor porcentual se expresa en la relación del desnivel y la distancia horizontal expresada en tanto por ciento.

Periféricos de entrada: Unidades de entrada de la información al ordenador. Permiten la comunicación entre el ordenador y los usuarios. Son elementos integrados en el proceso de recogida y transferencia de los datos, aunque no se les considere, propiamente, que formen parte del ordenador.

Reclasificación (raster): Operaciones que transforman los valores de una capa o fichero de información en una nueva imagen, bien recodificando los valores o categorías existentes, bien concentrando las categorías presentes en un número más reducido (variables cualitativas), bien agrupando los valores existentes en intervalos (variables cuantitativas), bien modificando los valo-

res de las celdas por la operación algebraica de una constante o la aplicación de una función determinada (trigonométrica, etc.).

Recodificación (raster): Operación que consiste en sustituir los códigos existentes, como valores de los píxeles, por otros nuevos, de acuerdo a un criterio que reorganice los mismos.

Resolución de una imagen raster: Tamaño del píxel de la imagen. La dimensión de la celda es básica en la confección del mapa, de manera que cuanto más reducido sea la misma más precisa será la representación de la imagen; en contrapartida, mayor será la memoria ocupada por el fichero que almacene la información.

Superposición algebraica (raster): Operación de superposición de imágenes raster que supone la obtención de una nueva capa de información, mediante operaciones de suma, resta, multiplicación, división, etc.

Superposición de capas: Operación de superponer o registrar dos o más bases cartográficas digitales, con la finalidad de obtener otra base que contenga la información de las bases iniciales.

Superposición lógica (O LÓGICO) (raster): Operación de superposición de imágenes raster que define las zonas de un territorio que cumplen una de dos condiciones a la vez.

Superposición lógica (Y LÓGICO) (raster): Operación de superposición de imágenes raster que origina la intersección de las áreas del territorio que cumplen dos condiciones a la vez. El producto de dos capas de información, expresadas con variables de tipo lógico o booleano, origina una nueva imagen, donde los valores iguales a la unidad cumplen ambas condiciones.

Teledetección: Técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre, desde sensores instalados en plataformas espaciales. La energía solar se refleja en la superficie de la Tierra, en unas determinadas frecuencias, que recibidas por el satélite permiten la deducción de las características y propiedades de la cubierta reflectante. Cada zona o espacio diferencial del territorio es identificado por el contraste energético recibido, haciendo posible la reconstrucción del mosaico geográfico terrestre.

V. BIBLIOGRAFÍA

- BARREDO CANO, J. I. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*. Madrid: Editorial Rama, 264 págs.
- BERRY, J. K. (1987): "A mathematical structure for analysing maps" en *Environmental Management*, vol 11, nº 3, pp 317-325.
- BOSQUE SENDRA, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Editorial Rialp, 451 págs.
- CHUVIECO SALINERO, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección espacial*. Madrid: Editorial Rialp, 453 págs.
- CHUVIECO SALINERO, E. (2002): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Editorial Ariel, 586 págs.
- GARCÍA LÁZARO, F. J. (2002): *Sistemas de Información Geográfica*. Material didáctico no editado. Escuela de Ingenieros Técnicos Topógrafos. Madrid.
- GUTIÉRREZ PUEBLA, J. y GOULD, M. (1994): *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Síntesis, 251 págs.
- HEYWOOD, I. y otros (1998): *An Introduction to Geographical Information Systems*. Longman. New York, 279 págs.
- KEITH, R. (1995): *Resource Management Information Systems*. London: Taylor Francis, 415 págs.
- SANTOS PRECIADO, J. M. (2002): *El tratamiento informático de la información geográfica*. Cuadernos de la UNED, Madrid: UNED, 380 págs.
- SANTOS PRECIADO, J. M. (2004): *Sistemas de Información Geográfica*. Unidad didáctica. Madrid: UNED, 460 págs.