

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y MODELIZACIONES HIDROLÓGICAS: UNA APROXIMACIÓN A LAS VENTAJAS Y DIFICULTADES DE SU APLICACIÓN

Munir Morad*
Alejandro Triviño Pérez**

RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Por esa razón, cada vez más investigadores se ayudan de los SIG para la construcción de modelos hidrológicos, especialmente cuando es necesaria la representación espacial de redes de drenaje. El presente artículo examina algunos aspectos de los numerosos vínculos existentes entre los SIG y la modelización hidrológica. Como punto de partida se establece una visión global de los esfuerzos realizados en el pasado y las tendencias actuales observadas a la hora de aplicar estos sistemas al análisis hidrológico. A continuación se describen someramente algunos de los beneficios que las estructuras de datos orientadas a objetos tienen en estos modelos, enfatizando su posible impacto en estudios de carácter temporal. Los errores involucrados en la utilización de datos digitales y sus efectos en los modelos también son tratados. Para finalizar, desde un punto de vista crítico se evalúan las limitaciones técnicas de los SIG en los procesos de modelización hidrológica.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelizaciones hidrológicas, modelos hidrológicos.

* Director de coordinación académica de las licenciaturas en Sistemas de Información Geográfica, School of Earth Sciences & Geography, Kingston University, Kingston upon Thames, Surrey, U.K.

** Becario de Investigación de la Generalitat Valenciana, Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante.

Fecha de recepción: julio de 2001.

Fecha de admisión: septiembre de 2001.

ABSTRACT

Geographic information systems (GIS) and hydrology are allied disciplines. Hydrology researchers are increasingly using GIS to aid their modelling work; especially where there is a requirement for the digital representation of spatial watershed characteristics. This paper reviews several aspects of the growing links between GIS and hydrological modelling. The paper begins by providing a summary of past efforts and current trends in using GIS to perform hydrological analysis. The potential benefits of object orientated data structures for hydrological modelling, in particular their likely impact on temporal studies, are described. A focus is put on the literature that discusses the nature of errors involved in using digital data and their effects on hydrological models. Finally, the review critically assesses the limitations of GIS use in hydrological modelling.

Key words: Geographical Information Systems (GIS), hydrological modelling, hydrological models.

ZUSAMMENFASSUNG

Hydrologen benützen für ihre Modelle – beispielsweise um Wasserscheiden oder Drainagesysteme räumlich darzustellen – in zunehmendem Maße Geographische Informationssysteme (GIS). Dieser Artikel untersucht verschiedene Aspekte der wachsenden Anwendungsmöglichkeiten von GIS für hydrologische Modellierungen. Der Beitrag gibt zunächst einen Überblick über bisherige GIS-Anwendungen in der Hydrologie und zeigt aktuelle Trends auf, wie hydrologische Analysen unter Zuhilfenahme von GIS durchgeführt werden. Danach werden die möglichen Vorteile von objektorientierten Datenstrukturen für die hydrologische Modellierarbeit beschrieben, wobei insbesondere auf den Einfluß dieser Daten auf zeitbezogene Untersuchungen eingegangen wird. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Artikels liegt in der Analyse der wissenschaftlichen Literatur, die sich mit der Natur von Fehlern beschäftigt, die bei der Benutzung von digitalen Daten für hydrologische Modelle auftreten können. Abschließend erfolgt eine kritische Diskussion der Einschränkungen und Grenzen von GIS-Technologien für hydrologische Modellierungen.

Schlüsselworte: Geographische Informationssysteme (GIS), hydrologische Modellierungen, hydrologische Modelle.

1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Información Geográfica, también conocidos con el acrónimo SIG, han inspirado tantas definiciones como personas hay que escriben sobre ellos. Desde un punto de vista global un SIG puede ser considerado un conjunto organizado de *hardware*, *software*, datos y técnicas eficientemente diseñadas para la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, visualización y análisis de información geográficamente referenciada

(GRID/UNEP, 1993). Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación los define como sistemas computerizados para el almacenamiento, elaboración y recuperación de información con equipo y programas informáticos expresamente concebidos para trabajar con datos georeferenciados y sus correspondientes atributos temáticos (FAO, 1988).

Efectivamente, el término SIG alude a un sistema de información espacial automatizado e internamente referenciado, diseñado para la gestión y análisis de datos espaciales y la elaboración de cartografía (Berry, 1990). Berry (1990) señala que la naturaleza de los datos geográficos con los que trabajan estos sistemas pueden ser de dos clases: espacialmente agregados, como por ejemplo, las clasificaciones edafológicas; o geográficamente referenciados. Esta última categoría la conforman datos espacialmente coherentes y representables en un mapa. Los mapas digitales pueden ser manipulados automática o manualmente, mientras que su referenciación con respecto al sistema de información espacial puede ser externa o interna. De acuerdo con Berry (1990) un sistema externamente referenciado utiliza el ordenador para almacenar la información de distintas áreas geográficas, sin embargo la localización de cada una de ellas está indicada en mapas separados. Por el contrario, los sistemas internamente referenciados poseen un enlace automático entre la componente temática (los atributos alfanuméricos) y la espacial (la localización geográfica y las propiedades espaciales de los objetos). Estos mapas digitales constituyen las bases fundacionales de los «verdaderos» SIG.

La descripción realizada hasta el momento se ajusta a los intereses de los especialistas en recursos naturales, difiriendo sustancialmente de las aportadas por los científicos especializados en recursos hídricos (Johnson *et al.*, 1988). Para estos últimos los SIG son equipos y programas informáticos destinados al desarrollo, procesamiento, almacenamiento y recuperación de datos espacialmente distribuidos. En esta concepción los SIG actúan como gestores de gráficos, flexibles, interactivos y muy competentes para la modelización espacial de redes de drenaje. La diferencia esencial entre las concepciones expuestas por Berry (1990) y Johnson (1988) quizás podría entenderse mejor en términos de Sistemas Soporte de toma de Decisiones (*Decision Support Systems*, DSS). Desde esta óptica se asume de antemano que un SIG es a la vez un DSS. Labadie (1989) identifica tres subsistemas fundamentales en la composición de los DSS diseñados para la gestión de recursos hídricos: los subsistemas diálogo, datos y modelo¹. Atendiendo a este esquema la conceptualización realizada por Berry supone aceptar que los SIG son un DSS compuesto por los tres subsistemas antedichos, mientras que la definición de Johnson sugiere que los SIG poseen tan sólo dos de ellos, los subsistemas datos y diálogo, pero no el subsistema modelo. En opinión de Berry la ausencia del subsistema modelo implica que el SIG está externamente referenciado en lugar de estarlo internamente, y por definición, el sistema de información espacial no es un «verdadero» SIG.

1 La eficacia en la gestión de los DSS descansa en el grado de integración de los tres subsistemas que lo componen. El subsistema diálogo facilita la comunicación entre usuario y sistema, accediendo a la base de datos mediante consultas (lenguaje SQL...). El subsistema datos se corresponde con la información y las bases de datos, ya sean internas o externas. Por último, el subsistema modelo permite aplicar a los datos expresiones cuantitativas con el objetivo de crear modelos.

Las discrepancias sobre si las aplicaciones científicas de los SIG poseen o no el subsistema modelo, probablemente se deben a las limitaciones que tuvieron para satisfacer la compleja programación y los requerimientos informáticos demandados durante los años 80. Por fortuna, los últimos avances han superado muchas de las dificultades del pasado. En la actualidad su tecnología es capaz de procesar series de datos temporales, ejecutar operaciones de mapa orientadas a objetos, e incluso realizar segmentaciones dinámicas de arcos (Chen, 1996; Ye, 1996). A la sazón, podemos concluir afirmando que los modernos SIG son DSS completos con buenas cualidades para la construcción de modelos hidrológicos.

2. LA TECNOLOGÍA ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: UNA VISIÓN GLOBAL

Los SIG se componen de una base de datos espacialmente referenciada y de un conjunto de instrucciones y procedimientos que permiten operar sobre ella (Borough y McDonell, 1998). Hasta llegar a la situación actual estos sistemas han experimentado una evolución que se asienta sobre tres pilares. El primero de ellos es la cartografía tradicional y los procedimientos técnicos para el análisis de mapas. La identificación, posesión y manipulación de datos geográficos obedece a una necesidad ancestral de la humanidad. Mucho antes de que los ordenadores comenzaran a emplearse los cartógrafos ya habían ideado sofisticadas nociones para el análisis espacial y la representación de información geográfica (Jones, 1997). En su legado encontramos métodos para implementar funciones espaciales tales como la superposición, intersección y cálculos de proximidad. Obviamente, el proceso de informatización posterior ha contribuido de manera notable a facilitar la ejecución de este tipo de operaciones (Borough y McDonnell, 1998).

Otro precursor de la aparición de la tecnología SIG es el grupo de aplicaciones informáticas asociadas al diseño asistido por ordenador (*Computer-Aided Design, CAD*) que surgieron en los años 60 (Heywood *et al.*, 1998). Estos programas son fruto de los rápidos avances experimentados por el diseño de bases de datos y la introducción de eficientes rutinas para ejecutar operaciones de localización, conectividad y rutas. Por supuesto, todas estas funciones han sido pródigamente adoptadas por la hidrología con la implementación de los SIG. El tercer y último pilar es el de los gráficos digitales. Durante los años 60 y 70 la visualización digital de gráficos vivió importantes progresos, sin los cuales estos sistemas no habrían alcanzado el grado de utilidad que actualmente poseen (Jones, 1997). Junto con las mejoras gráficas fueron programadas nuevas rutinas con el propósito de disponer de las funciones de análisis espacial creadas por los cartógrafos. En un primer momento sus aplicaciones fueron experimentadas en las pioneras bases de datos que se estaban diseñando para los programas CAD. Algunos ejemplos notorios se corresponden con rutinas hoy ampliamente difundidas como las de punto en polígono, intersección de polígonos y operaciones de vectorización y rasterización (Bernhardsen, 1999).

Este proceso evolutivo favoreció la aparición de los SIG a mediados de los 60. En ningún momento debemos caer en el error de identificar estos sistemas con el *software*, ya que éste tan sólo es uno de sus componentes. La correcta implementación de un SIG debe considerar todos y cada uno de sus elementos fundamentales, entendiendo como tales el *software*, *hardware*, los datos y el personal cualificado (Maguire, 1991). Además, la representación digital

del mundo real supone conceptualizar el espacio, lo cual se realiza a través de los modelos de datos. De todo esto hacemos una pequeña reseña a continuación.

El modelo de datos en un SIG puede ser raster o vectorial. Las bases de datos de tipo raster están compuestas por una retícula regular en la que cada celda tiene asignado un valor discreto a modo de atributo (Chrisman, 1997). En el modelo vectorial las entidades² se definen por pares de coordenadas que configuran puntos, líneas o límites de polígonos para regiones con un mismo valor temático (Jones, 1997). Por supuesto cada modelo presenta sus propias ventajas e inconvenientes. Las bases de datos raster se caracterizan por ser muy simples y los cálculos sobre ellas bastante sencillos; sin embargo las vectoriales poseen complejas estructuras que requieren sofisticados algoritmos para el análisis (Burrough y McDonnell, 1998). No obstante, los datos vectoriales pueden ser almacenados compactamente y visualizados con gran precisión, a diferencia de lo que ocurre en el formato raster. Asimismo, estas representaciones muestran el característico efecto *aliasing*³ como consecuencia de la forma rectangular de las celdas que componen la retícula.

En lo que se refiere al *software* podemos afirmar sin temor a equivocarnos que disponemos de una gran cantidad de sistemas comerciales en el mercado. Los programas SIG recogen un considerable número de funciones orientadas al análisis espacial, ya que es uno de sus puntos fuertes y distintivos. Entre ellas se incluyen la superposición de mapas, el análisis de proximidad, el cálculo de áreas, perímetros y volúmenes, el análisis de rutas, la elaboración de estadísticas y mapas algebraicos, etc... (Chrisman, 1997; Burrough y McDonnell, 1998; Bernhardsen, 1999). También son indispensables utilidades para la migración y conversión de datos entre distintos programas SIG, y entre los SIG y otras aplicaciones externas como los programas CAD. En un nivel superior algunos sistemas ofrecen la posibilidad de llevar a cabo funciones analíticas junto a comandos del sistema operativo a modo de un lenguaje interpretado de programación. Estos lenguajes macro proporcionan un conjunto de instrucciones que facilitan la elaboración de análisis en modelos hidrológicos.

Otro elemento destacado es la información geográfica. Los SIG con asiduidad se nutren de datos que tienen su origen en fuentes muy diversas. En muchas ocasiones los datos se obtienen indirectamente, habiendo sido elaborados por otros grupos de trabajo. En estas condiciones la información puede ser utilizada inmediatamente, o casi de inmediato, ya que lo habitual es que los datos previamente necesiten una conversión de formato o una transformación del sistema de referencia. En otros casos el trabajo se centra en un área de estudio de la que no se dispone de información, haciéndose indispensables funciones para la introducción de datos en el sistema. Con la intención de superar estas limitaciones la mayor parte del *software* SIG incluye funciones de digitalización, verificación de datos, rasterización y georeferenciación (Clarke, 1997).

Con respecto al *hardware* las plataformas más utilizadas son los ordenadores personales y las estaciones de trabajo. Dadas las características de los SIG destacan una serie de componentes informáticos sobre el resto. Es aconsejable que el monitor sea a color con una gran

2 Para la *Spatial Data Transfer Standard* (SDTS) de los Estados Unidos de América las entidades son cosas en el mundo real, mientras que los objetos se corresponden con la representación de las entidades en el mundo digital (Mark, 1999). Terminología muy difundida y ampliamente aceptada en el campo de los SIG.

3 Efecto escalera que se produce en las imágenes digitales.

resolución de pantalla para la visualización de gráficos; el disco duro de gran capacidad para el almacenamiento de ingentes cantidades de datos; y el microprocesador lo suficientemente potente para ejecutar funciones analíticas. Entre los equipamientos opcionales se incluyen periféricos extremadamente útiles como las tabletas digitalizadoras para la creación de datos; impresoras y *plotters* para salidas gráficas en formato papel; y dispositivos para el almacenamiento masivo de información. Afortunadamente en nuestros días la informática ha alcanzado el punto en que los equipos son de sobremesa y su adquisición puede realizarse a costes muy razonables, favoreciendo la difusión de los SIG en el mercado.

3. EXCELENCIAS DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LAS MODELIZACIONES HIDROLÓGICAS

Debemos tener en cuenta dos consideraciones que ayudan a entender mejor el valor que los SIG están adquiriendo en la construcción de modelos hidrológicos. La primera de ellas es la aceptación generalizada de que son una herramienta muy productiva. El segundo argumento hace referencia a sus importantes aportaciones de cara a la aprehensión de los sistemas y modelos hidrológicos. Estas dos circunstancias legitiman su utilización en investigaciones vinculadas a la hidrología. Más si cabe cuando en el futuro los avances en este campo dependerán de nuevas visiones y adelantos conceptuales, muchos de los cuales pueden surgir de la utilización de modelos hidrológicos en los SIG

Estos sistemas cuentan con un gran número de funciones que le confieren una elevada operatividad. Entre las más productivas podríamos destacar las funciones de introducción de datos y análisis espacial. Por otra parte, tal y como hemos señalado con anterioridad algunas de las funciones analíticas preprogramadas ya incluyen los cambios de escala, reclasificación y transformación de datos, rutinas de interpolación, análisis de proximidad, superposición y combinación de capas de información, operaciones de vecindad y un completo juego de operadores lógicos y aritméticos. Los SIG también pueden ser programados para reemplazar una función de distribuciones probables por un valor nominal en un área de estudio concreta. Tareas de esta índole permiten mejorar la representación de la variabilidad inherente en la componente espacial de sistemas naturales como los hidrológicos. Además, todas estas características ayudan a integrar y combinar las bases de datos, procesando grandes cantidades de información con múltiples atributos.

En lo que se refiere a la modelización de la componente espacial estas herramientas aceleran los procesos de desarrollo e implementación de modelos hidrológicos. Los SIG pueden actuar a modo de plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos (elaboración de prototipos). No debemos olvidar que los lenguajes macro disponibles en muchos programas proporcionan comandos de alto nivel para ejecutar funciones analíticas. Estos construyen los modelos con mayor rapidez y eficacia que las técnicas de programación estándar. Puesto que la complejidad y el tiempo de codificación y depuración de errores es directamente proporcional a la potencia del programa; un modelo hidrológico puede ser implementado en menos tiempo del que sería necesario con un lenguaje estándar.

Otra de las cualidades bien valoradas de los SIG son sus aportaciones para la mejor interpretación y análisis de modelos y sistemas. La estructura de datos en capas o estratos de información es intuitiva y posibilita que los modelos puedan ser interpretados con menor

esfuerzo. Esta herramienta brinda al investigador la posibilidad de visualizar y entender con claridad las relaciones espaciales. Las estructuras y operaciones de los SIG garantizan que no se pierde la coherencia espacial en ninguno de los pasos de la modelización. Los valores de entrada, intermedios y de salida preservan en todo momento la georeferenciación y sus relaciones topológicas. Además, el usuario no está obligado a trabajar con la totalidad del sistema, sino que puede determinar qué procesos están sucediendo y qué salidas se están generando en cualquier localización del área estudiada. Eso sí, todos los parámetros y procesos permanecen distribuidos dentro del sistema o modelo.

4. MANIPULANDO LA COMPONENTE TEMPORAL EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Las dificultades de integración de series temporales de datos en entornos SIG ha supuesto un obstáculo importante para su difusión entre los investigadores del campo de la hidrología. Raper y Livingstone (1995) apuntan que el concepto de tiempo debe ser integrado en las modelizaciones y que este proceso siempre se ha mostrado especialmente problemático en los SIG. También han observado que los modelos medioambientales suelen estar geométricamente indexados, es decir, que la clave primaria de las entidades referenciadas se corresponde con un sistema de coordenadas (la localización geográfica). Este método de representación espacial imposibilita el solapamiento de varios valores en una misma posición, haciendo muy difícil la representación de evoluciones espacio-temporales. En otras palabras, aunque a un mismo territorio le correspondan tantos valores como transformaciones haya sufrido, tan sólo es posible representar una de ellas, y por tanto, esa situación reflejará un momento temporal concreto y no su evolución.

Ante esta tesitura la componente temporal puede ser gestionada de distintas maneras dependiendo del modelo de datos seleccionado. En las bases de datos de tipo raster las variaciones temporales se representan utilizando una secuencia de capas para la misma variable y área de estudio (Raper y Livingstone, 1995). En cada capa los valores de las celdas representan el estado del fenómeno estudiado en un momento dado. En los SIG vectoriales el problema se solventa reduciendo las estructuras de datos de 3-D a 2-D. Las tablas de atributos de las capas contienen las propiedades geográficas de las entidades, dotando a cada una de ellas con un único identificador numérico. En estas tablas los valores geográficos se almacenan en las columnas, mientras que las entidades confeccionan las filas. De este modo, los valores de una variable particular (por ejemplo, la precipitación o la humedad del suelo) pueden asociarse a una escala de tiempo. El método convencional utilizado para añadir la componente temporal a las tablas de atributos de los SIG vectoriales, consiste en crear un campo nuevo para cada intervalo de tiempo y conservar las filas con las entidades.

El lenguaje orientado a objetos plantea un método alternativo a las representaciones geométricas comentadas más arriba. En este modelo de datos la representación espacial de las entidades está supeditada a sus propiedades y comportamiento (Raper y Livingstone, 1995). En el contexto del análisis hidrológico, un objeto bien podría representar las características físicas de una corriente de agua o una red de drenaje, mientras que al comportamiento del objeto se le atribuyen los procesos hidrológicos que en ellos acontecen. Apréciase que tanto el estado como el comportamiento son dos conceptos independientes que pueden ser tratados

por separado. Esto es así porque las variables de estado se almacenan y gestionan por la base de datos del sistema, y el comportamiento está determinado por la selección del modelo que mejor se ajusta a los objetivos de la modelización. La estructura de la base de datos debe cumplir esa doble condición pudiéndose además compartir con otros modelos externos. Desde el punto de vista de la construcción de modelos hidrológicos los objetos creados para una aplicación tienen la ventaja de que pueden ser utilizados en otras similares y así sucesivamente. Esta cualidad explotada correctamente ayuda a implementar sistemas de gestión de bases de datos eficientes y genéricas cuyas tareas difieran dependiendo del tipo de datos utilizados.

La aparición de lenguajes de programación orientados a objetos, tales como *Avenue*⁴, han hecho posible el desarrollo de estrategias alternativas para la gestión del tiempo. Si tomamos como paradigma el *ArcView GIS*, un popular SIG vectorial de ESRI (*Environmental Systems Research Institute Inc.*), la solución vendría dada por la sustitución de las entidades (el campo SHP) por el tiempo como clave principal de la tabla de atributos. Esta operación hace que los campos de la tabla se correspondan con las entidades. Por esa razón, los nombres de cada uno de estos campos muestran el número de identificación del objeto que representan (Maidment, 1996).

Los grandes obstáculos que los SIG han encontrado a la hora de tratar las evoluciones espacio-temporales limitaron su aplicabilidad a estudios en hidrología. Hoy en día esta limitación se ha reducido considerablemente, hasta el punto en que los modelos espacialmente distribuidos y los sistemas con una componente temporal dinámica pueden ser fácilmente elaborados. De esta forma los SIG no se reducen a un simple repositorio de datos espaciales alimentando a un modelo temporal externo. Algunos estudios han aplicado estos conceptos al campo de la hidrología, destacando los modelos creados recientemente por Ackermann (1996), Costa *et al.* (1996), Fedra y Jamieson (1996), Shiba *et al.* (1996) y Ye (1996).

5. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

Maidment (1991) ha agrupado las aplicaciones de los SIG en hidrología de la siguiente manera:

- Evaluación e inventarios hidrológicos.
- Determinación de parámetros hidrológicos.
- Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico).
- Construcción de modelos hidrológicos integrados.

La mayor parte de las aplicaciones hidrológicas llevadas a cabo en los SIG son evaluaciones de riesgos naturales y estudios de localización. Ambas tienen muchos aspectos en común e incluso poseen un cierto parecido, aunque disponen de un tratamiento diferente. En los estudios de localización de actividades las condiciones para la implantación son conoci-

4 *Avenue* es el lenguaje programación para la personalización y el desarrollo de aplicaciones en el *ArcView GIS*.

das a priori. En estos casos la aplicación de operadores booleanos a datos de distinta naturaleza se ha mostrado muy eficaz para sondear con rapidez las áreas más apropiadas y desfavorables para la instalación de una determinada actividad. Por su parte, en las evaluaciones de riesgos naturales se ejecutan operadores aritméticos algo más complejos con el propósito de generar índices sobre la totalidad o una sección de la cuenca hidrográfica. Estos índices generalmente dan como resultado una representación aritmética y ponderada de los atributos más relevantes para el estudio. Ejemplos interesantes son el índice para la valoración del riesgo de contaminación de aguas subterráneas DRASTIC⁵ (Halliday y Wolfe, 1990) y los modelos aplicados a la capacidad de carga de un territorio (Johnston, 1987).

En las modelizaciones hidrológicas debemos diferenciar con claridad lo que es el conjunto de procedimientos y recursos utilizados en el proceso de modelización, de la manera en que estos se implementan en los SIG. La mayor parte de los investigadores utilizan esta herramienta para generar parámetros que den un sentido lógico a la modelización. Para ello se emplean procedimientos de cálculo ya existentes que normalmente han sido ideadas fuera del campo de los SIG, convirtiéndolos en una mera herramienta para la gestión de información geográfica. Un ejemplo de esto lo encontramos en Muzik (1988), que alimentó un SIG con datos de usos del suelo y clasificaciones edafológicas bajo la premisa de calcular automáticamente la relación matemática entre precipitación y escorrentía en áreas concretas de cuencas hidrográficas. Otros como Berry y Sailor (1987) utilizando datos topográficos han calculado eso mismo y además han estimado los tiempos necesarios para la acumulación de agua.

Wolfe y Neale (1988) han descrito la aplicación de un SIG para el desarrollo de un modelo hidrológico espacialmente distribuido y parametrizado (*Finite Element Storm Hydrograph Model*, FESHM). En este caso particular el modelo se compone de dos partes que precisan niveles de discretización diferentes. La primera de ellas observa la aparición de escorrentía en el área de estudio. Su cálculo es realizado para cada una de las superficies identificadas como unidades de respuesta hidrológica (*Hydrological Response Units*, HRU). Las HRU sencillamente son áreas con un mismo comportamiento y capacidad de respuesta ante las precipitaciones. Esta primera discretización se consigue integrando, gracias a la función de superposición de polígonos de los SIG, los usos del suelo con la clasificación edafológica. La otra parte del FESHM analiza la dirección, sentido y cantidad de escorrentía, para lo cual la zona del estudio debe también discretizarse mediante la identificación de subcuencas de drenaje. Esto último desarrollando un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en el SIG.

Relacionado con el modelo anterior White (1988) ha utilizado los SIG para combinar el grado de permeabilidad del suelo con las cantidades de precipitación recogidas, hallando la distribución de los valores de escorrentía. Por su parte Steube y Johnston (1990) los han empleado para delimitar cuencas y estimar la cantidad total de agua que podría drenar un área concreta. De este modo se completa de principio a fin dentro de un entorno SIG un método

5 El modelo DRASTIC (*Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact and Conductivity*) crea un índice ampliamente difundido en los estudios de vulnerabilidad de aguas subterráneas. A modo informativo enumeramos los componentes necesarios para su cálculo: profundidad del agua, tasa neta de recarga, propiedades del suelo, topografía, impacto y conductividad hidráulica del acuífero.

para hallar la relación matemática existente entre precipitación y escorrentía. Posteriormente Choudhry *et al.* (1997a) ya utilizaron el conocido *Arc/Info GIS* de ESRI para construir modelos de escorrentía. Estos estudios y sus aplicaciones han demostrado fehacientemente las ventajas que conlleva la modelización de la distribución espacial de datos hidrológicos.

Estos sistemas también permiten resolver cuestiones vinculadas con la delimitación de cuencas hidrológicas. Es un hecho constatado y común que la delimitación topográfica de cuencas no tienen por qué coincidir con los límites de las unidades de respuesta hidrológica (HRU). De hecho, hemos de recordar que estas áreas se delimitan atendiendo exclusivamente a la clasificación edafológica y a los usos del suelo, y no a la topografía. Por esa razón, si deseamos conocer la cantidad total de escorrentía que le corresponde a una subcuenca, necesitaremos ejecutar las funciones de superposición de polígonos. La escorrentía total es igual a la suma de las cantidades de agua contenidas por los polígonos completos y los fragmentos de polígonos de las HRU que quedan en el interior de la subcuenca.

Los investigadores en hidrología encuentran cada vez más efectivo el uso de los SIG debido a su gran capacidad para gestionar datos distribuidos y referenciados en el mundo real. Actualmente las aplicaciones hidrológicas están prestando una mayor atención a los modelos que contemplan la componente espacial y temporal de los datos, desarrollando a su vez métodos de programación orientada a objetos. Un ejemplo que ilustra la utilización de este tipo de estructura de datos es el modelo de escorrentía superficial creado por Ye (1996). Sobre este modelo se pueden ejecutar todas aquellas funciones que son consideradas normales, es decir, la construcción, simulación, modificación y procesamiento de resultados. Este modelo realza las aptitudes de los SIG para llevar a cabo operaciones de mapa orientadas a objetos, no en vano combina los tres elementos básicos para la simulación hidrológica, a saber:

- 1) ecuaciones para la interpretación de procesos hidrológicos;
- 2) mapas para la delimitación del área de estudio; y
- 3) bases de datos con tablas que caracterizan la región estudiada y los parámetros del modelo.

Choudhry *et al.* (1997b) han evaluado el modelo de Ye en sus estudios sobre previsiones de recogida de aguas en la cuenca del río Kaimai en Nueva Zelanda. Según estos autores, el modelo ha resultado ser un buen instrumento para la planificación y gestión estratégica de recursos hídricos, aunque también es cierto que cuenta con grandes limitaciones a la hora de realizar predicciones con una cierta urgencia o premura. A este respecto bastaría con recordar algunas de las condiciones atmosféricas que caracterizan el ámbito mediterráneo, en donde es frecuente la formación rápida de centros de acción que dan lugar a precipitaciones de fuerte intensidad horaria. En cualquier caso, a pesar de esa limitación en su operatividad, el modelo ha contribuido significativamente a difundir el uso de los SIG como herramienta de modelización hidrológica, superando antiguos obstáculos para la integración de series temporales y permitiendo operaciones de mapa orientadas a objetos. Hay otros muchos ejemplos de estudios que han utilizado este el modelo de datos orientado a objetos: Shiba *et al.* (1996) lo han utilizado con el fin de ampliar y mejorar los beneficios que comportan los modelos de escorrentía. Ackerman *et al.* (1996) desarrollaron un sistema de optimización y simulación inte-

grada para centrales hidroeléctricas y embalses. La aplicación práctica de este sistema en la cuenca alemana del río Mosel obtuvo unos resultados fabulosos. Aproximaciones similares en las que se integran series temporales han sido esgrimidas por Costa *et al.* (1996) para la gestión de recursos hídricos en Portugal.

De los párrafos precedentes se desprende que la aplicación de los SIG en las tareas de modelización hidrológica están aumentando considerablemente. Son numerosos los investigadores que han trabajado o trabajan en este campo. Por ello, resultaría infructuoso incidir en todos y cada uno de los estudios elaborados, siendo más conveniente indicar a modo de ejemplo algunas de las líneas generales en las que se enmarcan. Así, cuestiones relacionadas con los modelos de escorrentía también han sido tratados por Bhaskar *et al.*, (1992), Drayton *et al.*, (1992), El Kady (1992), Hendrix y Buckley (1992), Lanfear (1992), See *et al.*, (1992), Swayne *et al.* (1992), Tarboton (1992), Willeke (1992), Brilly *et al.*, (1993), Chairat y Delleur (1993), De Vantier y Feldman (1993), Djokic y Maidment (1993), Lepink *et al.*, (1993), Meyer *et al.*, (1993), Ross y Tara (1993), Sharda *et al.*, (1993), Shamsi (1993), Shea *et al.*, (1993), Smith (1993), Ryberg y Storer (1997), Goonetilleke y Jenkins (1999) y Frankhauser (1999). Por último, aplicaciones sobre contaminación difusa, Sistemas Soporte de toma de Decisiones y modelizaciones de acuíferos han sido examinadas por Hamlett y Peterson (1992), Hamlett *et al.* (1992), Horn y Grayman (1993), Tong (1992), Mckinney *et al.*, (1993), Males y Grayman (1992), Schoolmaster y Marr (1992), Watts y Moreau (1992), Bateleaan *et al.*, (1993), Vieux y Needham (1993), Walsh (1993), Srinivasa y Arnold (1994), Gupta *et al.* (1996), Hahn (1996), Michl (1996) y Basnyat *et al.* (1999).

6. LOS ERRORES EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SUS IMPLICACIONES EN LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Los estudios elaborados por Goodchild (1982), Clarke (1985), Burrough (1986), Lodwick *et al.* (1990), Piwowar, *et al.* (1990), Goodchild *et al.* (1992) y Van der Knapp (1992) han enfatizado la necesidad de evitar los errores asociados a la utilización de información digital. Es un hecho aceptado que los errores son consustanciales a los propios datos y que obviamente los SIG no pueden obtener resultados con una resolución de salida mejor que la de entrada. Ello es motivo suficiente para que los usuarios siempre procuraran averiguar el grado de fiabilidad de la información antes de utilizarla. Estas afirmaciones son particularmente ciertas cuando se pretende hacer uso de los datos en modelizaciones hidrológicas. No obstante, un error de pequeña magnitud da lugar a entradas erráticas que ocasionan importantes desviaciones en la componente espacial del modelo.

El origen de los errores es muy diverso, valgan como muestra los procesos de generalización cartográfica, la vectorización y rasterización de datos, los cambios de escala, etc. A grandes rasgos los errores se cometen debido a la ignorancia de la calidad de la fuente suministradora de información, y al desconocimiento de cómo operan las instrucciones y procedimientos de los programas SIG. La utilización de datos de escasa calidad provoca la propagación de errores dentro del mismo modelo, y consecuentemente tiene efectos negativos sobre los resultados. Si nos referimos a los errores en la componente espacial de los modelos hidrológicos debemos hacer mención a los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Resulta conveniente destacar que el conjunto de datos digitales necesarios para construir un

MDE es asimismo considerado esencial en los modelos hidrológicos. Del análisis de estos datos se pueden extraer muchas de las características hidrológicas de un área de estudio. Son precisamente las cualidades operativas de los MDE las que están haciendo que su tratamiento sea un procedimiento común y necesario en todas las modelizaciones orientadas al campo de la hidrología. Sin embargo, a menudo muchos usuarios realizan estas tareas sin considerar la precisión de los datos o cómo ésta podría afectar a la fiabilidad de los resultados (Choudhry y Morad, 1998). Por último, reseñamos algunos estudios que han empleado los MDE para analizar las características hidrológicas del territorio: Mark y Goodchild (1982), Mark *et al.* (1984), Tabios y Salas (1985), Band (1986), Goodchild y Mark (1987), Hutchinson (1989), Wood y Fisher (1993), Vieux (1995), Garbrecht *et al.* (1996), Guercia *et al.* (1996) y Jay y Chu (1996).

6.1. Errores derivados de la captura de datos

La exactitud posicional se define como la desviación esperada en la localización geográfica de un objeto con respecto a su posición real (Aronoff, 1989; Chrisman, 1997). Un procedimiento muy utilizado para averiguar la exactitud posicional de un conjunto de datos consiste en seleccionar puntos de control y comparar sus coordenadas con otra fuente de información independiente y precisa. Otro aspecto interesante es la exactitud de la componente temática, es decir, la fiabilidad de los atributos asociados a la información espacial. En estos casos los errores hacen referencia al problema de si los valores vinculados a puntos, líneas y polígonos son correctos o no. En un mapa temático de usos del suelo, por ejemplo, un error de etiquetado puede hacer que confundamos un área forestal con otra de cultivos. Esto tendría gravísimas repercusiones en la interpretación hidrológica posterior de los datos. En general, el grado de exactitud alcanzado hoy en día se sitúa en la horquilla que va del 60 al 85%, y es específico de cada área de estudio (Choudhry y Morad, 1998).

Tan y Shih (1991) han investigado los errores provocados por un proceso de digitalización manual. Sus resultados evidencian que los mapas digitalizados por varias personas, o por personas sin experiencia, tienden a acumular importantes errores geográficos. Dunn *et al.* (1990) han discutido cuestiones sobre exactitud posicional y errores de medición en bases de datos de usos del suelo. Ellos implementaron un método para estimar la incertidumbre posicional y los errores de medición inducidos por la digitalización de polígonos. Tampoco han olvidado los errores originados por la conversión de datos vectoriales al formato raster. De un modo más amplio Walsh *et al.* (1987) han estudiado cómo localizar y medir los errores producidos por la captura de datos en el contexto de los SIG. Por último destacan Lodwick *et al.* (1990) que en sus estudios desarrollaron métodos con el fin de medir el error en la componente temática y sus posibles consecuencias en los mapas de aptitud.

6.2. Errores derivados de los procesos de generalización

La generalización de información geográfica es posiblemente el problema fundamental de la investigación en el campo de los SIG, y esto es así debido a la compleja interacción existente entre la escala, la representación cartográfica y los errores (McMaster y Shea, 1992). La mayor parte de la información espacial en formato digital deriva en primera instancia de

mapas tradicionales (en papel) y de sensores remotos. Por esa razón no es extraño que contengan errores inducidos por la generalización manual o automática de los datos. Las consecuencias que conlleva un proceso de generalización pueden manifestarse de diferentes formas, por ejemplo a través de cambios en la longitud y ángulos de los elementos representados, o la eliminación y desplazamiento de determinados atributos. La combinación de varios de estos errores afectan a las funciones de análisis espacial de los SIG, siendo especialmente sensibles los modelos hidrológicos.

Cualquier proceso de generalización manual introduce errores en los mapas tradicionales, los cuales se trasladan posteriormente a los SIG cuando son convertidos al formato digital. Las imágenes de satélite en formato raster tampoco se libran de interpretaciones erróneas en su clasificación y medición. Por ello, concretar la magnitud y naturaleza de la generalización en las diferentes clases de datos geográficos es una labor muy apreciada para la construcción de modelos hidrológicos (Joao *et al.*, 1993). Más si cabe cuando se constata que la mayor parte de la información geográfica está disponible en formato raster o vectorial. De este modo, la conversión entre formatos es totalmente necesaria, aunque al transformar un mapa vectorial a otro de tipo raster y viceversa el proceso de generalización siempre genera algún error. Esto sucede porque cada celda de la retícula tan sólo puede contener un único valor de atributo, el cual técnicamente se corresponde con la característica dominante o más significativa. Este tipo de error en la clasificación ocurre normalmente cuando el tamaño de las celdas de la retícula es mayor que las entidades representadas, o cuando varios valores caen dentro de una misma celda. En estrecha relación con estas cuestiones Carver y Brunson (1994) han estudiado la correspondencia entre la complejidad de las líneas, el tamaño de las celdas de la retícula y los errores introducidos por la rasterización. Breght *et al.* (1991) han importado al formato raster el mapa de suelos de Holanda (escala 1:50.000) utilizando tres tamaños de celda y dos métodos distintos de rasterización. La relación entre la complejidad del mapa y el error generado por el proceso la establecieron con una ecuación de regresión. Heuvelink y Burrough (1989), Wang *et al.* (1990) y Hunter y Beard (1992) son otros autores que también han examinado los errores inducidos por la rasterización.

6.3. Errores de interpolación y Modelos Digitales de Elevaciones

En recientes estudios sobre errores en los SIG, Chouldhry *et al.* (1997c; 1997d; 1997e; 1997f) han demostrado que los métodos de generalización pueden crear datos que comprometen significativamente la fiabilidad de los modelos hidrológicos. En una prueba realizada sobre un área de 88 kilómetros cuadrados, 3,67 se perdieron tras el proceso de generalización con una tolerancia de limpieza de 50 metros. Sin embargo, con una tolerancia de 4 metros no se encontraron efectos negativos destacados en las características hidrológicas del área. Estos estudios abogan por sacrificar el tiempo de procesamiento de los datos y el tamaño de los mismos para conseguir una exactitud verificable. En este sentido los avances experimentados en geo-estadística están proporcionando útiles técnicas para la interpolación y cuantificación del error. Precisamente, Atkinson (1999) ha estudiado la inserción de geo-estadísticas en programas informáticos basados en plataformas SIG, sobre todo de cara a su uso en muestreos, evaluación y propagación de errores. Este autor percibe un cambio de orientación en la apli-

cación de este tipo de estadísticas, pasando de su uso inicial en interpolaciones a otros vinculados con la evaluación de la exactitud.

6.4. Errores que afectan al sentido de los flujos

Una parte fundamental de los modelos hidrológicos es la representación de cómo los flujos de agua discurren por la superficie terrestre. En los MDE de formato raster el cálculo del sentido de los flujos es efectuado a partir de los descensos en el valor de la altitud. Los hundimientos o concavidades de una superficie pueden definirse como aquellas celdas que no tienen otras adyacentes a una altitud inferior, es decir, que desde ellas no es posible que discurra el agua hacia otros puntos (Martz y Garbrecht, 1999). Cuando estas no aparecen marcadas con claridad, en general se asume que la causa de la concavidad es consecuencia de una estimación a la baja de los valores de altitud de las celdas que lo conforman. Estas infravaloraciones pueden ser producidas por errores en los datos originarios, errores generados por el proceso de interpolación utilizado para crear el MDE, o por alguna de las facetas asociadas a los niveles de precisión que se aplican a los MDE (Martz y Garbrecht, 1992). Desafortunadamente la tendencia es a eliminar las concavidades del terreno, pues se asume que las depresiones son debidas a una infravaloración en la altitud de las celdas, y por tanto se debe utilizar un algoritmo que las rellene o la tape (Hutchinson, 1989; Tribe, 1992). Sin embargo, el origen de muchas de ellas está en la sobrestimación de la altitud de las celdas circundantes, es decir, en todo lo contrario. Hay razones de envergadura para sugerir que el algoritmo antes de seleccionar la correspondiente acción correctiva, debería identificar si la concavidad está originada por una sobrestimación o infravaloración de la altitud (Martz y Garbrecht, 1999). Así, cuando nos encontramos con depresiones pequeñas y angostas asumimos que su origen es causa directa de la sobrestimación de alguna de las celdas que la circundan. Entonces, la concavidad es alterada disminuyendo los valores de las celdas circundantes. El resto de depresiones son tratadas como si sufrieran una infravaloración, y consecuentemente rellenadas.

7. LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LAS MODELIZACIONES HIDROLÓGICAS

Los trabajos realizados con SIG para la elaboración de modelos hidrológicos están incrementándose rápidamente, y muchas cuestiones como la gestión de series temporales de datos y la generalización han sido ampliamente discutidas. A pesar de que esta herramienta ofrece interesantes ventajas operativas a los investigadores en hidrología, aún hay algunas inquietudes que están limitando su uso:

- 1) Los modelos de distribución de parámetros hidrológicos son creados con el propósito de representar el comportamiento espacial de los elementos que mejor se ajustan a la gestión integrada de cuencas. Los algoritmos utilizados en estos modelos con frecuencia se basan en experimentos a escala de laboratorio y pequeñas parcelas en donde las características del suelo están bien definidas. Cuando estos parámetros se aplican a grandes cuencas o subcuencas la tendencia es a conservar un valor cons-

- tante. Las diferencias entre escalas requieren procesos de generalización de datos que socavan la validez del modelo.
- 2) Las operaciones estadísticas disponibles en los programas SIG aún están bastante limitadas (Fotheringham y Rogerson, 1994). Recientemente se han realizado algunos intentos para añadirles nuevas funcionalidades creando vínculos con los paquetes geo-estadísticos (McCord y Oslon, 1989; Bailey, 1994). Un ejemplo destacado es el SIG diseñado por Schlagel y Newton (1996) con el objetivo de analizar las transformaciones espaciales de los usos del suelo. Estos intentos no han sido suficientes y todavía es necesario incrementar sus funcionalidades estadísticas y matemáticas, lo que permitiría mejorar la representación de las superficies y de los procesos que en ellas acontecen.
 - 3) La construcción de modelos hidrológicos en un SIG a menudo trae consigo la asunción de determinadas limitaciones. Así, por ejemplo, la simple combinación de capas no considera la co-varianza ni la interacción entre variables. Por otra parte, el modo en que se agregan los datos también repercute en los modelos resultantes. Estas cuestiones solamente pueden ser superadas cuando el usuario tiene una buena comprensión de la estructura de los modelos hidrológicos y de las técnicas utilizadas, además de un elevado conocimiento de las funciones y los modelos de datos de los SIG (McDonnell, 1996).
 - 4) La mayor parte de las mediciones hidrológicas en los SIG asumen algún grado de error. Variables como la topografía y los suelos son comunes en todos los modelos hidrológicos, aunque cada vez son más necesarias informaciones espaciales específicas. En este sentido los sistemas remotos están siendo muy utilizados como fuente de datos (Giles *et al.*, 1994; Hogg *et al.*, 1993; Sorman *et al.*, 1993; Sharma y Singh, 1992). La interpolación y generalización de información con diversos orígenes inducen múltiples errores que deben ser controlados.
 - 5) La integración en los SIG de los procesos hidrológicos de aguas superficiales y subterráneas aún no está muy lograda. El principal problema reside en la combinación de estos procesos con la escala, el espacio y el tiempo. Un mapa puede ser dibujado a cualquier escala, pero no está claro hasta que punto los modelos pueden ser aplicados a diferentes escalas (Maidment, 1996).

8. CONSIDERACIONES FINALES

En este artículo hemos pretendido proporcionar al lector una aproximación de las ventajas y dificultades que conlleva la utilización de los SIG como herramienta para la creación de modelos hidrológicos. La aplicación de estos sistemas en el caso particular de las modelizaciones hidrológicas ha ido *in crescendo* en los últimos años, apreciándose actualmente una gran diversidad en los objetivos y resultados. Afortunadamente, las nuevas tecnologías han superado los problemas de integración de series temporales de datos que antaño restringían su uso. Sin embargo, esta herramienta todavía plantea importantes limitaciones como consecuencia de los niveles de resolución de datos espaciales, la escala, o la integración entre modelos de superficie y subsuperficiales. Pese a las dificultades de interpretación de determinados modelos, su difusión y progresos están alcanzando un nivel muy elevado. De hecho,

si comparamos el estado actual con el que había hace algunos años, las perspectivas para mejorar la integración entre la hidrología y los SIG son bastantes halagüeñas.

BIBLIOGRAFÍA

- ACKERMANN, T., KONS, L., Y KONGETER, J. (1996): «Development of an integrated simulation and optimization system of river power plants and river reservoirs», en *Proceedings of International Conference on Applications of GIS in Hydrology and Water Resources Management*, IAHS Publication N° 235, Viena, Austria, págs. 235-252.
- ARONOFF, S. (1989): *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canadá, 294 págs.
- ATKINSON, P. M. (1999): «Geographical information science: geostatistics and uncertainty», en *Progress in Physical Geography*, Vol. 23, N° 1, págs. 134-142.
- BAILEY, T. C. (1994): «A review of statistical spatial analysis in GIS», en Fotheringham, S. and Rogerson, P. (editores), *Spatial Analysis and GIS*. Taylor & Francis, Reino Unido.
- BAKER, C. P. Y PANCIERA, E. C. (1990): «A GIS system for groundwater planning», en *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 45, N° 2, págs. 246-248.
- BAND, L. E. (1986): «Topographic partition of watersheds with digital elevation models», en *Water Resources Research*, Vol. 22 N° 1, págs. 15-24.
- BASNYAT, P., TEETER, L. D., Y FLYNN, K.M. (1999): «Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries», en *Environmental Management*, Vol. 23, N° 4, págs. 539-549.
- BATELEAAN, O., DESMEDT, F. Y HUYBRECHTS, W. (1993): «Development and application of groundwater model integrated in the GIS GRASS», en *IAHS Publication* N° 211, págs. 581-588.
- BERNHARDSEN, T. (1999): *Geographical Information Systems: An introduction*. John Wiley and Sons, New York, USA, 372 págs.
- BERRY, J. K. (1990): «Maps as data: Fundamental concepts and applications in GIS technology for resource management», en *Internal Report, Natural resources*. Colorado University, Fort Collins, Colorado, USA, 50 págs.
- BERRY, J. K. Y SAILOR, J. K. (1987): «Use of GIS for storm runoff prediction from small watersheds», en *Environmental Management*, Vol. 11, N° 1, 21 págs.
- BHASKAR, N. R., JAMES, W. P. Y DEVULPALI, R. S. (1992): «Hydrologic parameter estimation using GIS», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 18, N° 5, págs. 492-512.
- BREGHT, A. K., DENNEBOOM, J., GESINK, H. J., Y RANDEN, VAN Y. (1991): «Determination of Rasterising Error: a case study with soil map of Netherlands», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 5, N° 3, págs. 361-367.
- BRILLY, M., SMITH, M. Y VIDMAR, A. (1993): «Spatially oriented surface water hydrological modeling», en *IAHS Publication* N° 211, págs. 547-557.
- BURROUGH, P. A. (1986): *Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, 193 págs.

- BURROUGH, P. A. Y MCDONNELL, R. (1998): *Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido.
- CARVER, S. J. Y BRUNSDON, C. F. (1994): «Vector to raster conversion error and feature complexity: an empirical study using simulated data», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 8 N° 3, págs. 261-270.
- CHAIRAT, S. Y DELLUR, J. W. (1993): «Integrating a physically based hydrological model with grass», en *IAHS Publication N° 211*, págs. 14-150.
- CHEN, H. (1996): *Object watershed link simulation (OWLS)*. Tesis Doctoral, Oregon State University, Oregon, USA.
- CHOUDHRY, S. Y MORAD, M. (1998): «GIS errors and surface hydrological modeling: An examination of effects and solutions», en *Journal of Survey Engineering*, Vol. 124, N° 3, págs. 134-143.
- CHOUDHRY, S., BARDSLEY, W. E. Y MORAD, M. (1997a): «Rainfall-runoff modelling of Opuiaki river catchment, NZ using GIS», en *Proceedings of International Conference on Water/Land (Wai Whenua)*, del 24 al 28 noviembre, Auckland, Nueva Zelanda, págs. 435-438.
- CHOUDHRY, S., BARDSLEY, W. E. Y MORAD, M. (1997b). *Hydrologic modelling: comparison of spatial and lumped approaches*, (sin publicar).
- CHOUDHRY, S., BARDSLEY, W. E. Y MORAD, M. (1997c): «DEM errors and their effects on surface runoff modelling», en *Proceedings of International Conference on Computer methods in Water Resources*, del 16 al 18 de junio, Líbano.
- CHOUDHRY, S., BARDSLEY, W. E. Y MORAD, M. (1997d): *GIS errors and surface hydrological modeling – problems and solutions*, (sin publicar).
- CHOUDHRY, S., BARDSLEY, W. E. Y MORAD, M. (1997e): «DEM accuracy and its importance in hydrological modelling», en *Proceedings of Symposium on Water Resources Education, Training and Practice*, American water resources association, (Ed. John J. Warwick), del 29 de junio al 3 de julio, págs. 764.
- CHOUDHRY, S., BARDSLEY, W. E. Y MORAD, M. (1997f): «A new technique of building digital elevation model for hydrological modelling», en *Proceedings of international Conference on modelling and Simulation*, Tasmania, Australia, del 8 al 11 de diciembre, págs. 444-449.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. Y MAYS, L. W. (1988): *Applied Hydrology*. McGraw Hill International Editions, USA.
- CHRISMAN, N. (1997): *Exploring Geographical Information Systems*. John Wiley and Son, Chichester, Reino Unido.
- CLARKE, K. C. (1997): *Getting Started with Geographical Information Systems*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- CLARKE, K. C. A. (1985): «Comparative analysis of polygon to raster interpolation methods», en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 51 N° 5, págs. 575-582.
- CONESA, C. (1996): «Áreas de aplicación medioambiental de los SIG. Modelización y avances recientes», en *Papeles de Geografía N° 23-24*, Universidad de Murcia, Murcia, págs. 101-115.

- CONESA, C., ÁLVAREZ, Y., BELMONTE, F., VIVERO, M^a, Y RODRÍGUEZ, T. (1996): «Simulación mediante SIG de áreas inundables en el tramo inferior de la Rambla de Nogalte (Cuenca del Segura)», en *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, SIG y Teledetección*, AGE, Vitoria, págs. 192-201.
- COSTA, J. R. D., JESUS, H. B., Y LACERDA, M. (1996): «Integrating GIS and time series analysis for water resources management in Portugal», en *IAHS Publication N° 235*, Viena, Austria, págs. 289-297.
- DE VANTIER, B. A. Y FELDMAN, A. D. (1993): «Review of GIS applications in hydrological modeling», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 229-245.
- DJOKIC, D. Y MAIDMENT, D. R. (1993): «Application of GIS network routines for water flow and transport», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 229-245.
- DRAYTON, R. S., WILDE, B. M. Y HARRIS, J. H. K. (1992): «Geographical approach to distribute modeling», en *Hydrological Processes*, Vol. 6, págs. 361-368.
- DUNN, R., HARRISON, A. R. Y WHITE, J. C. (1990): «Positional accuracy and measurement error in digital databases of landuse: An empirical study», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, N° 4, págs. 385-398.
- EL KADY, M. M. (1992): «A GIS for water resources management in Cairo», en *Journal of Water Resources Development*, Vol. 8, N° 3, págs. 182-185.
- FEDRA, K. Y JAMIESON, D. G. (1996): «An object oriented approach to model integration: a river basin information system example», en *IAHS Publication N° 235*, págs. 669-676.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (1988): *Food and agriculture organization of United Nations, Working paper*. FAO, Bangkok, Tailandia, 30 págs.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (1988): *Food and agriculture organization of United Nations, Working paper*. FAO, Bangkok, Tailandia, 30 págs.
- FOTHERINGHAM, S. Y ROGERSON, P. (1994): *Spatial Analysis and GIS*. Taylor and Francis, Reino Unido.
- FRANKHAUSER, R. (1999): «Automatic detection of imperviousness in urban areas from digital orthophotos», en *Water Science Technology*, Vol. 39, N° 9, pp. 81-86.
- GARBRECHT, J., STARKS, P.J. Y MARTZ, L. W. (1996): «New digital landscape parameterization methodologies», en *Proceedings of the Symposium on GIS and Water Resources*. American Water Resources Association, del 22 al 26 de septiembre, Fort Lauderdale, Florida, USA, 357 págs.
- GARCÍA, E. Y GALACHO, F. B. (1992): «Aplicación de tecnología SIG en la elaboración de una cartografía de las zonas de riesgo de inundación en el sector oeste de la ciudad de Málaga», en *V Coloquio de Geografía Cuantitativa*, AGE, Zaragoza, págs. 115-126.
- GILES, P.T., CHAPMAN, M. A. Y FRANKLIN, S. E. (1994): «Incorporation of a digital elevation model derived from stereoscopic satellite imagery in automated terrain analysis», en *Computers and Geoscience*, Vol. 20, págs. 441-460.

- GOODCHILD, M. F. (1982): «The Fractional Brownian Process as a Terrain Simulation Model», en *Proceedings of 13th Annual Pittsburgh Conference. On Modelling and Simulation*, Vol.13, págs. 1133-1137.
- GOODCHILD, M. F. Y MARK, D. M. (1987): «The fractal nature of geographical phenomena», en *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 77, N° 2, págs. 265-278.
- GOODCHILD, M. F., GUOQING, S., Y SHIREN, Y. (1992): «Development and test of an error model for categorical data», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 6, N° 2, págs. 87-104.
- GOONETILLEKE, A. Y JENKINS, G. A. (1999): «The role of geographical information systems in urban hydrological modeling», en *Journal of the Chartered Institute of Water Engineers*, Vol. 13, N° 3, págs. 200-206.
- GRAYSON, R. B., BLOSCHL, G., BARLING, R. D., Y MOORE, I. D. (1993): «Process, scale and constraints to hydrological modelling in GIS», en *IAHS Publication N° 211*, págs. 83-92.
- GRID/UNEP (1993): *Global resource information database / United nations educational program*. Asian Institute of Technology, Bangkok, Tailandia.
- GUERCIO, R. Y SOCCODATA, F. M. (1996): «GIS procedure for automatic extraction of geomorphological attributes from TIN-DTM», en *IAHS Publication N° 235*.
- GUPTA, A. D., GANGOPADHAY, S., GAUTAM, T. R. Y ONTA, P. R. (1996): «Aquifer characterization using an integrated GIS-neural network approach», en *IAHS Publication N° 235*, págs. 513-520.
- GUSTAVO, E. D. Y BROWN, T. C. (1997): «AQUARIUS: An object oriented model for efficient allocation of water in river basins», en *Proceedings of Symposium on Water Resources Education, Training and Practice*. American Water Resources Association, (Ed. John J. Warwick), del 29 de junio al 3 de julio, págs. 835-844.
- HAHN, L. (1996): «Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from nitrates and pesticides on a regional scale», en *IAHS Publication N° 235*, págs. 521-526.
- HALLIDAY, S. L. Y WOLFE, M. L. (1990): «Assessing Groundwater Pollution Potential from Agricultural Chemicals Using a GIS» en *Proceedings of International Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 25, N° 3, 630 págs.
- HAMLETT, J. M. Y PETERSON, G. W. (1992): «GIS for non-point source pollution ranking of watersheds», en *Update Water Resources*, N° 87, The Universities Council on Water Resources, págs. 21-25.
- HAMLETT, J. M., MILLER, D. A., DAY, R. L., PETERSON, G. W., BAUMER, G. M. Y RUSSO, J. (1992): «Statewide GIS-based ranking of watersheds for agricultural pollution prevention», en *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 47, N° 5, págs. 399-404.
- HENDRIX, W. G. Y BUCKLEY, D. J. A. (1992): «Use of a GIS for selection of sites for land application of sewage waste», en *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 47, Mayo-Junio, págs. 271-275.
- HEUVELINK, G. B. M., Y BURROUGH, P. A. (1989): «Propagation of errors in spatial modelling with GIS», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 3, págs. 303-322.

- HEYWOOD, I., CORNELIUS, S. Y CARVER, S. (1998): *An Introduction to Geographical Information Systems*. Addison Wesley Longmann, Harlow, Reino Unido.
- HOGG, J., MCCORMACK, J. E., ROBERTS, S. A., GAHEGAN, M.N. Y HOYLE, B. S. (1993): «Automated derivation of stream channel networks and selected catchment characteristics from DEM», en P.M. Mather (editor), *Geographical Information Handling – Research and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido, págs. 207-235.
- HORN, C. R. Y GRAYMAN, W. M. (1993): «Water quality modelling with EPA reach file system», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, Nº 2, págs. 262-274.
- HUNTER, G. J., Y BEARD, K. (1992): «Understanding error in spatial database», en *The Australian Surveyor*, Vol. 37, págs. 108-119.
- HUTCHINSON, M. F. (1989): «A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits», en *Journal of Hydrology*, Vol. 106, págs. 211-232.
- JAY, L. Y CHU, C. (1996): «Spatial structures of digital terrain models and hydrological feature extraction», en *HydroGIS'96, IAHS publication*, Nº 235, págs. 201-206.
- JOAO, E., HERBERT, G., RHIND, D. W., OPENSHAW, S. Y RAPER, J. (1993): «Towards a generalization machine to minimize generalization effects within a GIS», en P.M. Mather (editor), *Geographical Information Handling – Research and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido, págs. 63-78.
- JOHNSON, L. E., DALLMAN, J., TOMS, E. Y HUFFMAN, C. (1988): «Geographical Information System for Hydrological modelling», en *Proceedings of the 3rd Water Resource Operations Management Division*, ASCE, págs. 736-749.
- JOHNSON, L. E. (1989): «MAPHYD: a digital map-based hydrological modelling system», en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, Nº 6, págs. 911-917.
- JOHNSTON K. M. (1987): «Natural resources modeling in the GIS environment», en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, págs. 1411-1415.
- JONES, C. B. (1997): *Geographical Information Systems and Computer Cartography*. Addison Wesley Longman, Harlow, Reino Unido.
- LABADIE, J. W. (1989): «Decision Support Systems in Water Resources», en *Proceedings Stochastic Hydrology in Water Resources: Simulation, and Optimization*, NATO Advanced Study Institute, Peñíscola, España.
- LANFEAR, K. J. (1992): «Water resources applications of GIS by the US geological survey», en *Update Water Resources*, Nº 87, The Universities Council on Water Resources, págs. 12-16.
- LEPINK, M. R., KEMP, K. K., Y LOAICIGA, H. A. (1993): «Implementation of GIS for water resources planning and management», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, Nº 2, págs. 184-205.
- LEU, C. H. Y WANG, S. S. (1991): «Using GIS and pattern recognition technologies in estimating overland runoff», en *Proceedings of International Conference on Computer Applications in Water Resources*, Vol. 2, Tamkang University, Tamsui, Taiwan, págs. 619-626.
- LODWICK, W. A., MONSON, W. Y SVOBODA, L. (1990): «Attribute error and sensitivity analysis of map operations in GIS: suitability analysis», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, Nº 4, págs. 413-428.

- MAGUIRE, D. J. (1991): «An overview and definition of GIS», en Maguire, D.J., Goodchild, M. F. y Rhind, D. W. (editores), *Geographical information systems: principles and applications*, Longman, Harlow, Reino Unido, págs. 9-20.
- MAIDMENT, D. R. (1996): «GIS and hydrological modelling – an assessment of progress», en *Proceedings of 3rd International Conference on GIS and environmental modelling*, New Mexico, USA.
- MAIDMENT, D. R. (1993): «GIS and hydrological modeling», en Goodchild, M.F., Parks, B.O. and Steyaert, L. (editores), *Environmental modelling with GIS*, Oxford University Press, New York, USA, págs. 147-167.
- MALES, R. M. Y GRAYMAN, W. M. (1992): «Past, present and future of GIS in water resources», en *Update Water Resource Issues*, N° 87, The Universities Council on Water Resources, págs. 5-11.
- MARK, D. M. (1999): «Spatial representation: a cognitive view», Longley, P., Maguire, D.J., Goodchild, M. F. y Rhind, D. W. (editores), *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, John Wiley and Sons, Chichester, Reino Unido, págs. 81-88.
- MARK, D., DOZIER, J. Y FREW, J. (1984): «Automated basin delineation from digital elevation data», en *Geoprocessing*, Vol.2, págs. 299-311.
- MARK, D. M. Y GOODCHILD, M. F. (1982): «Topographic model for drainage networks with lakes», en *Water Resources Research*, Vol.18, págs. 275-280.
- MARTZ, L. W. Y GARBRECHT, J. (1999): «An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in raster DEM», en *Computers and Geosciences*, Vol. 25, N° 7, págs. 835-844.
- MARTZ, L. W. Y GARBRECHT, J. (1992): «Numerical definition of drainage networks and sub-catchment areas from digital elevation models», en *Computers and Geosciences*, Vol. 18, N° 6, págs. 747-761.
- MCCORD, R. A. Y OSLON, R. J. (1989): «New dimensions from statistical graphics for GIS analysis and interpolation» en *Proceedings of the 9th Annual ESRI User Conference*, ESRI, Redlands California, USA.
- MCDONNELL, R. A. (1996): «Including the spatial dimension: using geographical information systems in hydrology», en *Progress in Physical Geography*, Vol. 20, N° 2, págs. 159-177.
- MCKINNEY, D. C., MAIDMENT, D. R. Y TANRIVERDI, M. (1993): «Expert GIS for Texas water planning», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 170-183.
- MCMASTER, R. Y SHEA, K. S. (1992): «Generalization in digital cartography», en *Association of American Geographers*, Washington DC, USA.
- MENDIZÁBAL, A., RODRÍGUEZ, E. Y GARCÍA, F. (1992): «Aplicación de SIG a la evaluación de recursos hidráulicos», en *Los SIG en la Gestión Territorial*, AESIGYT, Madrid, págs. 447-453.
- MEYER, S. P., SALEM, T. H. Y LABADIE, J. H. (1993): «GIS in urban storm water management», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 206-228.

- MICHL, C. (1996): «Using GIS, MODFLOW, MODPATH for groundwater management of an alluvial aquifer of the River Sieg, Germany», en *IAHS Publication* N° 235, págs. 551-558.
- MUZIK, I. (1988): «Application of GIS to SCS Procedure for Design Flood Hydrographs», en *Proceedings of International Symposium on Modelling in Agricultural, Forest and Rangeland Hydrology*, Chicago, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA, págs. 494-500.
- NEMANI, R., RUNNING, S. W., BAND, L. E., Y PETERSON, D. L. (1993): «Regional hydroecological simulation system: an illustration of the integration of ecosystem models in a GIS», en M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L. Steyaert, (editores), *Environmental modelling with GIS*, Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, pp. 296-304.
- NEWELL, C. J., HAASBEEK, J. F. Y BEDIANT, P. B. (1990): «A hydro-geologic database for groundwater modeling», en *Groundwater*, Vol. 28, N° 2, págs. 224-234.
- Piowar, J. M., LeDrew, E. F., y Dudchya, D. J. (1990): «Integration of spatial data in vector and raster formats in a geographical information system environment», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, N° 4, págs. 429-444.
- RAPER J. Y LIVINGSTONE, D. (1995): «Development of a geomorphological spatial model using object-orientated design», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 9, N° 4, págs. 359-383.
- ROSS, M. A. Y TARA, P. D. (1993): «Integrated hydrological modelling with GIS», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 129-140.
- ROSS, M. A., FIELLAND, C. E. Y TARA, P. D. (1990): «An integrated GIS – hydrological model for phosphate mining reclamation design», en *Proceedings of Symposium on Transferring Models to Users*, AWRA, págs. 31-39.
- RYBERG, P. T. Y STORER (1997): «Water budget study using a GIS database (Arc/Info) and DEM-based streamflow routing examples from Toby Creek watershed, Clarion County, Pennsylvania, USA», en *Proceedings of Symposium on Water Resources Education, Training and Practice*, American Water Resources Association, (Ed. John J. Warwick), del 29 de junio al 3 de julio, 897 págs.
- SASOWSKY, K. C. Y GARDNER, T. W. (1991): «Watershed configuration and GIS parameterization for SPUR model hydrological simulations», Vol. 27, N° 1, págs. 7-18.
- SCHOOLMASTER, F. A. Y MARR, P. G. (1992): «GIS as a tool in water use data management», en *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, N° 2, págs. 331-336.
- SCHLAGEL, J. D. Y NEWTON, C. M. (1996): «GIS based statistical method to analyze spatial change», en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, N° 7, págs. 839-844.
- SEE, R. B., NAFTZ, D. L. Y QUALLS, C. L. (1992): «GIS assisted regression analysis to identify sources of selenium in streams», en *Water Resources Bulletin*, Vol. 28, N° 2, págs. 315-330.
- SHARMA, K. D. Y SINGH, S. (1992): «Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model», en *Hydrological Processes*, Vol. 37 N° 1-2, págs. 39-52.
- SHAMSI, U. M. (1993): «GIS applications in water, wastewater and stormwater projects», en *Proceedings of International Conference on Environmental Ground Water Resources Utilisation*, AIT, Bangkok, Tailandia, págs. 53-62.

- SHARDA, D., KUMAR, M. V. R., VENKATRATNAM, L. Y RAO, T., MALLESWAR, C. (1993): «Watershed prioritisation for soil conservation – A GIS approach», en *Geocarto International*, Vol. 1, págs. 27-34.
- SHEA, C., GRAYMAN, W., DARDEN, D., MALES, R. M. Y SUSHINSKY, P. (1993): «Integrated GIS and hydrological modelling for countrywide drainage study», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, Nº 2, págs. 112-128.
- SHIBA, M., ICHIKAWA, Y., IKEBUCHI, S., TACHIKAWA, Y., Y TAKASAO, T. (1996): «Scale-up of runoff model using GIS and object oriented hydrological modelling system, proceedings of international conference on applications of GIS in hydrology and water resources management», en *IAHS Publication*. Nº 235, Viena, Austria, págs. 63-70.
- SMITH, M. B. (1993): «A GIS based distributed parameter hydrological model for urban areas», en *Hydrologic Processes*, Vol. 7, págs. 45-61.
- SORMAN, A.U., BASMACI, Y. Y EREN, K. (1993): «Applications of water balance model to western Saudi Arabia and use of GIS in future», en *IAHS Publication* Nº 211, Wallingford, págs. 685-693.
- SRINIVASAAN, R. Y ARNOLD, J. G. (1994): «Integration of a basin-scale water quality model with GIS», en *Water resources bulletin*, Vol. 30, págs. 453-462.
- STUEBE, M. M. Y JOHNSTON, D. M. (1990): «Runoff Volume Estimation Using GIS Techniques», en *Water Resources Bulletin*, Vol. 26, Nº 4, págs. 611-620.
- SWAYNE, D. A., ONGLEY, E., LAM, D. C. L. Y FRASER, A. S. (1992): «RAISON: Information system for managing water resources models and data», en *Water Resources Development*, Vol. 8, Nº 3, págs. 166-172.
- TABIOS III, G. Q. Y SALAS, J. D. (1985): «A comparative analysis o techniques for spatial interpolation of precipitation», en *Water Resources Bulletin*, Vol. 21 Nº 3, págs. 365-380.
- TAN, Y. R. Y SHIH, S. F. (1991): «Geographical Errors Involved in Data Entry of Geographic Information Systems», en *Proceedings of International Conference on Computer Applications in Water Resources*, Vol. 2, Tamkang University, Tamsui, Taiwan, págs. 627-634.
- TARBOTON, K. C. (1992): «Interfacing GIS and hydrological modelling: Mgeni case study», en *Water SA*, Vol. 18, Nº 4, págs. 273-278. Taiwan, págs. 597-603.
- TERSRIEP, M. L. Y LEE, M. T. (1991): «GIS databases and water quality modeling in agricultural and urban watersheds», *Proceedings of international conference on computer applications in water resources*, Vol. 2, Tamkang University, Tamsui, Taiwan.
- TERSRIEP, M. L. Y LEE, M. T. (1989): «Regional stormwater modelling, Q-Illudas and ARC/INFO», en *Computing in civil engineering*, ASCE, págs. 339-345.
- TONG, S. L. (1992): «mRAISON: GIS for water resource classification and management», en *Water Resources Development*, Vol. 8, Nº 3, págs. 173-181.
- TRIBE, A. (1992): «Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method», en *Journal of Hydrology*, Vol. 139, págs. 263-293.
- VAN DER KNAPP, W. G. M. (1992): «The vector to raster conversion: (mis)use in geographical information systems», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 6 Nº 2, págs. 159-170.

- VIEUX, B. E. (1995): «DEM aggregation and smoothing effects on surface runoff modelling», en J. McCarthy and J. McCarthy (editores), *Wetland and Environmental Applications of GIS*, CRC Press, Florida, USA, págs. 205-229.
- VIEUX, B. F. Y NEEDHAM, S. (1993): «Non-point Pollution Model Sensitivity to Grid Cell Size», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 141-157.
- VIEUX, B. E., BRALTS, V. F. Y SEGERLIND, L. J. (1988): «Finite Element Analysis of Hydrologic Response Areas Using GIS», in *Proceedings of the International Symposium on modelling in Agriculture, Forest and Range Land Hydrology*, Chicago, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA, págs. 437-446.
- WALSH, M. R. (1993): «Toward spatial decision support systems in water», en *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, N° 2, págs. 141-157.
- WALSH, S., LIGHTFOOT, D., Y BUTLER, D. (1987): «Recognition and Assessment of Error in GIS», en *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, págs. 1423-1430.
- WANG, F., HALL, G. B. Y SUBARYONO (1990): «Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software: database design and application», en *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, págs. 261-283.
- WATTS, K. N. Y MOREAU, D. H. (1992): «Experiences with the use of a desktop GIS for analysis of selected water resources problems», en *Update Water Resources*, N° 87, The Universities Council on Water Resources, págs. 34-40.
- WHITE, D. (1988): «Grid Based Application of Runoff Curve Numbers», en *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 114, págs. 601-612.
- WINBLAD, A. L., EDWARDS, S. D. Y KING, D. R. (1990): *Object-oriented software*. Addison-Wesley, USA.
- WILLEKE, G. E. (1992): «GIS and water resources», en *Update Water Resources*, N° 87, The Universities Council on Water Resources, págs. 17-20.
- WOLFE, M. L. Y NEALE, C. M. U. (1988): «Input Data Development for a Distributed Parameter Hydrologic Model (FESHM)», en *Proceedings of the International Symposium on modelling in Agriculture, Forest and Range Land Hydrology*, Chicago, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA, págs. 462-463.
- WOOD, J. D. Y FISHER P. F. (1993): «Assessing interpolation accuracy in elevation models», en *IEEE Computer Graphics and Applications*, págs. 48-56.
- YE, Z. (1996): *Map based surface and sub-surface simulation models*. Tesis Doctoral, University of Texas, USA.