

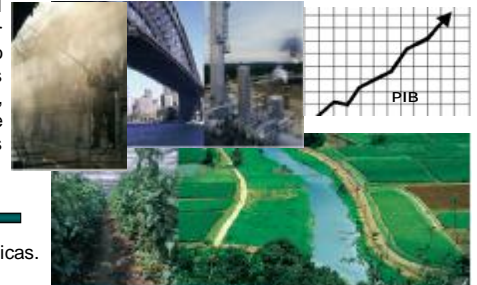


# MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA EL MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS HIDROLÓGICAS. ESTADO ACTUAL Y TENDENCIAS.

Humberto Silva Hidalgo, Ma. Teresa Alarcón Herrera, Ignacio R. Martín Domínguez  
Centro de Investigación en Materiales Avanzados.  
Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, 31109 Chihuahua, Chih., México.  
[humberto.silva@cimav.edu.mx](mailto:humberto.silva@cimav.edu.mx), [ignacio.martin@cimav.edu.mx](mailto:ignacio.martin@cimav.edu.mx)

## INTRODUCCIÓN

El Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (MIRH) es un proceso de planeación estratégica para promover el manejo y desarrollo conjunto del agua y recursos naturales relacionados, con la finalidad de lograr su mejor aprovechamiento económico y mayor bienestar social, sin perjuicio del medio ambiente (GWP-TEC, 2004). Ello implica el empleo de conocimientos de diversas disciplinas, así como aportaciones de los distintos actores involucrados, con el objeto de definir y poner en práctica soluciones integrales, eficientes, técnicamente posibles, socialmente aceptables y ambientalmente sustentables (WWC-CNA, 2006). Bajo un enfoque de MIRH se considera que la modelación matemática, el análisis de datos y la creación y mantenimiento de bases de datos digitales, son actividades que desarrollan capacidades técnicas que permiten dicha gestión (WWC-CNA, 2006b).



## OBJETIVO

Identificar la forma en que influye el enfoque MIRH, en el desarrollo de modelos matemáticos de cuencas hidrológicas.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Para que el agua sea motor del crecimiento y desarrollo, es necesario contar con un acceso confiable a ella en cantidad y calidad suficientes para la subsistencia, salud y producción, asociado a un nivel aceptable de riesgo, debido a la ocurrencia impredecible de fenómenos naturales. La instrumentación del MIRH necesariamente será diferente en países con un gran desarrollo en su infraestructura hidráulica con relación a los países que inician su desarrollo como es el caso de México (WWC-CNA, 2006). A través de los modelos matemáticos se pueden evaluar escenarios alternativos que modifican el comportamiento actual del sistema hidrológico (Silberstein, 2005), lo permite el desarrollo de capacidades técnicas que faciliten el MIRH.

De acuerdo con Anderson y Burt (1985), los modelos hidrológicos pueden clasificarse en tres grupos generales:

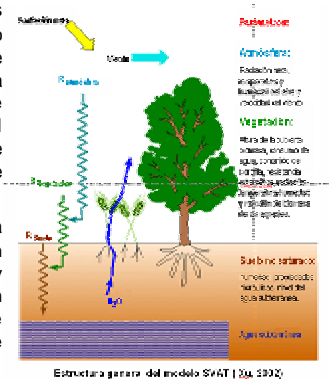
- 1) Físicamente basados.- Tratan de reproducir el comportamiento de componentes del ciclo hidrológico, basados en algún principio básico, como el de conservación de la masa, buscan describir la relación causa-efecto del fenómeno.
- 2) Conceptuales.- Consideran alguna ley física en una forma altamente simplificada para establecer una relación entre las variables de entrada y producir una salida.
- 3) Operacionales.- Relacionan las entradas y salidas de componente del ciclo hidrológico, sin intentar describir la relación causa-efecto del fenómeno.

Muchos de los modelos existentes frecuentemente están limitados para la escala y para los fines específicos para los cuales han sido desarrollados (Ahuja et al. 2005).



Los Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones (DSS por sus siglas en inglés) se han empleado buscando el enfoque de manejo integral, ya que éstos pueden incorporar la hidrología superficial, su interacción con el agua subterránea, modelos hidráulicos de cauces, modelos de estimación de requerimientos de agua para la agricultura que consideran precipitación y humedad de suelo, modelos de calidad del agua y transporte de contaminantes, así como factores socioeconómicos que podrían incidir en la toma de decisiones (Lanini et al., 2004). Sin embargo, dada la complejidad de los propios DSS, la escasez de datos hidrológicos, así como las dificultades para adaptar los modelos existentes a las necesidades del enfoque MIRH, frecuentemente es necesario desarrollar nuevos modelos (como submodelos) para representar los procesos hidrológicos que tienen lugar en las cuencas.

La modelación hidrológica, ha tenido éxito en la aplicación de modelos físicamente basados y distribuidos en cuencas pequeñas empleando datos con una resolución fina, sin embargo, el reto que se tiene todavía es su aplicación a una escala regional obteniendo buenos resultados (Xu, 2002). Los nuevos modelos que se desarrollan actualmente tienen el objeto de lograr un sistema de modelación integrado que vincule modelos de Transferencia-Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVAT por sus siglas en inglés), de agua subterránea, de nieve, de tránsito hidrodinámico, acoplado a Sistemas de Información Geográfica (SIG), Modelos Digitales de Elevación del Terreno y Modelos Generales de Circulación del Proceso Atmosférico Global (MGCPAG) (Xu, 2002). Sin embargo, el uso de los modelos SVAT aún está en etapa de prueba, debido a la complejidad de los procesos que representan, es posible encontrar varios conjuntos de valores de los parámetros del modelo que ofrecen resultados similares. Así mismo, la obtención de valores de los parámetros mediante calibración con mediciones de campo limitadas son altamente inciertos (Beven y Franks, 1999).



En Europa, a partir del año 2000, se demanda un nuevo enfoque holístico para el manejo de cuencas. Lo que ha incrementado la investigación para el desarrollo de marcos de trabajo que tengan la capacidad de integrar modelos de varias disciplinas en un ambiente de cómputo común y que satisfaga las características que demanda este nuevo enfoque integral. En la actualidad hay varias líneas de investigación para el desarrollo de marcos de trabajo genéricos para la modelación y sistemas de modelación modulares tales como los sistemas de modelación por objetos, el sistema de integrador de modelos LIANA y las interfaces de modelación abiertas (Krause, et al., 2005). Dichos sistemas modulares ofrecen un alto potencial para dar respuesta a la demanda de modelos con enfoques holísticos, requeridos por la urgencia de instrumentar un manejo integrado de los recursos hídricos.

## CONCLUSIONES

El MIRH ha propiciado una nueva brecha en lo que a modelación matemática de cuencas se refiere. En sus inicios, la modelación de cuencas se restringió al funcionamiento hidrológico de la cuenca, sin embargo, en la actualidad los modelos hidrológicos se visualizan como módulos de modelos que integran otras áreas del conocimiento, con la finalidad de evaluar alternativas y poder tomar decisiones respecto al manejo óptimo de una cuenca.

Los modelos hidrológicos por sí mismos representan una disciplina con varias líneas de investigación, que avanzan vertiginosamente con objetivos y metas propias, en el ámbito de la ciencia hidrológica.

### REFERENCIAS:

Anderson, M. G. y Burt, T. P., (1985), Modeling Strategies, in Hydrological Forecasting, Wiley Publication.

Ahuja, L. R., Ascough, J. C. y David, O., (2005), Developing natural resource models using the object modeling system: feasibility and challenges, *Advances in Geosciences*, 4: 29-36.

Beven, K.J. y Franks, S.W. (1999) Functional similarity in landscape SVAT modelling, *Hydrology and Earth System Sciences*, 3(1): 85-93.

Global Water Partnership, Technical Committee (GWP-TEC), (2004), Integrated Water Resources Management (IWRM) and Water Efficiency Plans by 2005, Why, What and How?, TEC Background Papers No. 10, GWP, Stockholm, Sweden.

Krause, P., Kralish, S. y Flügel, W.-A. (2005), Preface, Model integration and development of modular modeling systems, *Advances in Geosciences*, 4: 1-2.

Lanini, S., Courtosis, N. Giraud, F., Petit, V. y Rinaudo, J. D., (2004), Socio-hydrosystem modeling for integrated water-resources management – the Hérault catchment case study, southern France, *Environmental Modelling & Software*, 19: 1011-1019.

Silberstein, R. P. (2005), Hydrological models are so good, do we still need data?, *Environmental Modelling & Software*, article in press.

World Water Council - Comisión Nacional del Agua, (WWC-CNA), (2006), Eje Temático 2. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Documentos Temáticos, IV Foro Mundial del Agua, México, D. F. Pp: 55-82.

Xu, C.-Y., (2002), The Methodology of Model Evaluation, Chapter 6, in *Hydrologic Models*, Text Book, Uppsala University, Sweden, pp. 6-16-29.

# MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA EL MANEJO INTEGRADO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN CUENCAS HIDROLÓGICAS. ESTADO ACTUAL Y TENDENCIAS.

Humberto Silva Hidalgo, Ma. Teresa Alarcón Herrera, Ignacio R. Martín Domínguez

Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, 31109 Chihuahua, Chih., México.

humberto.silva@cimav.edu.mx, ignacio.martin@cimav.edu.mx

## 1 Introducción

El Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (MIRH) es un proceso de planeación estratégica para promover el manejo y desarrollo conjunto del agua y recursos naturales relacionados, con la finalidad de lograr su mejor aprovechamiento económico y mayor bienestar social, sin perjuicio del medio ambiente (GWP-TEC, 2004). Ello implica el empleo de conocimientos de diversas disciplinas, así como aportaciones de los distintos actores involucrados, con el objeto de definir y poner en práctica soluciones integrales, eficientes, técnicamente posibles, socialmente aceptables y ambientalmente sustentables (WWC-CNA, 2006). Bajo un enfoque de MIRH se considera que la modelación matemática, el análisis de datos y la creación y mantenimiento de bases de datos digitales, son actividades importantes para el desarrollo de capacidades técnicas que permitan dicha gestión (WWC-CNA, 2006b). Este análisis tiene el objeto de identificar la forma en que influye el enfoque MIRH, en el desarrollo de modelos matemáticos de cuencas hidrológicas.

## 2 Análisis y Discusión

Para que el agua sea motor del crecimiento y desarrollo, es necesario contar con un acceso confiable a ella en cantidad y calidad suficientes para la subsistencia, salud y producción, asociado a un nivel aceptable de riesgo, debido a la ocurrencia impredecible de fenómenos naturales. La instrumentación del MIRH necesariamente será diferente en países con un gran desarrollo en su infraestructura hidráulica con relación a los países que inician su desarrollo como es el caso de México (WWC-CNA, 2006). A través de los modelos matemáticos se pueden evaluar escenarios alternativos que modifican el comportamiento actual del sistema hidrológico (Silberstein, 2005), lo permite el desarrollo de capacidades técnicas que faciliten el MIRH.

De acuerdo con Anderson y Burt (1985), los modelos hidrológicos pueden clasificarse en tres grupos generales: 1) Los modelos físicamente basados tratan de reproducir el comportamiento de componentes del ciclo hidrológico, basados en algún principio básico, como por ejemplo el de conservación de la masa, éstos buscan describir la relación causa-efecto del fenómeno. 2) Los modelos conceptuales constituyen simplificaciones significativas de los anteriores, consideran alguna ley física pero en una forma altamente simplificada para establecer una relación entre las variables de entrada y producir una salida. 3) Los modelos operacionales relacionan las entradas y salidas de componente del ciclo hidrológico, sin intentar describir la relación causa-efecto del fenómeno. Sin embargo, muchos de los modelos existentes frecuentemente están limitados para la escala y para los fines específicos para los cuales han sido desarrollados (Ahuja *et al.* 2005).

Los Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones (DSS por sus siglas en inglés) se han empleado buscando el enfoque de manejo integral, ya que éstos pueden incorporar la hidrología superficial, su interacción con el agua subterránea, modelos hidráulicos de

cauces, modelos de estimación de requerimientos de agua para la agricultura que consideran precipitación y humedad de suelo, modelos de calidad del agua y transporte de contaminantes, así como factores socioeconómicos que podrían incidir en la toma de decisiones (Lanini *et al.*, 2004). Sin embargo, dada la complejidad de los propios DSS, la escasez de datos hidrológicos, así como las dificultades para adaptar los modelos existentes a las necesidades del enfoque MIRH, frecuentemente es necesario desarrollar nuevos modelos (como submodelos) para representar los procesos hidrológicos que tienen lugar en las cuencas.

La modelación hidrológica, ha tenido éxito en la aplicación de modelos físicamente basados y distribuidos en cuencas pequeñas empleando datos con una resolución fina, sin embargo, el reto que se tiene todavía es su aplicación a una escala regional obteniendo buenos resultados (Xu, 2002). Los nuevos modelos que se desarrollan actualmente tienen el objeto de lograr un sistema de modelación integrado que vincule modelos de Transferencia-Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVAT por sus siglas en inglés), de agua subterránea, de nieve, de tránsito hidrodinámico, acoplado a Sistemas de Información Geográfica (SIG), Modelos Digitales de Elevación del Terreno y Modelos Generales de Circulación del Proceso Atmosférico Global (MGCPAG) (Xu, 2002). Sin embargo, el uso de los modelos SVAT aún está en etapa de prueba, debido a la complejidad de los procesos que representan, es posible encontrar varios conjuntos de valores de los parámetros del modelo que ofrecen resultados similares. Así mismo, la obtención de valores de los parámetros mediante calibración con mediciones de campo limitadas son altamente inciertos (Beven y Franks, 1999).

En Europa, a partir del año 2000, se demanda un nuevo enfoque holístico para el manejo de cuencas. Lo que ha incrementado la investigación para el desarrollo de marcos de trabajo que tengan la capacidad de integrar modelos de varias disciplinas en un ambiente de cómputo común y que satisfaga las características que demanda este nuevo enfoque integral. En la actualidad hay varias líneas de investigación para el desarrollo de marcos de trabajo genéricos para la modelación y sistemas de modelación modulares tales como los sistemas de modelación por objetos, el sistema de integrador de modelos LIANA y las interfases de modelación abiertas (Krause, *et al.*, 2005). Dichos sistemas modulares ofrecen un alto potencial para dar respuesta a la demanda de modelos con enfoques holísticos, requeridos por la urgencia de instrumentar un manejo integrado de los recursos hídricos.

### **3 Conclusiones:**

El MIRH ha propiciado una nueva brecha en lo que a modelación matemática de cuencas se refiere. En sus inicios, la modelación de cuencas se restringió al funcionamiento hidrológico de la cuenca, sin embargo, en la actualidad los modelos hidrológicos se visualizan como módulos de modelos que integran otras áreas del conocimiento, con la finalidad de evaluar alternativas y poder tomar decisiones respecto al manejo óptimo de una cuenca.

Los modelos hidrológicos por sí mismos representan una disciplina con varias líneas de investigación, que avanzan vertiginosamente con objetivos y metas propias, en el ámbito de la ciencia hidrológica.

### **Referencias:**

Anderson, M. G. y Burt, T. P., (1985), *Modeling Strategies*, in *Hydrological Forecasting*, Wiley Publication.

Ahuja, L. R., Ascough, J. C. y David, O., (2005), Developing natural resource models using the object modeling system: feasibility and challenges, *Advances in Geosciences*, 4: 29-36.

Beven, K.J. y Franks, S.W. (1999) Functional similarity in landscape SVAT modelling, *Hydrology and Earth System Sciences*, 3(1): 85-93.

Global Water Partnership, Technical Committee (GWP-TEC), (2004), *Integrated Water Resources Management (IWRM) and Water Efficiency Plans by 2005, Why, What and How?*. TEC Background Papers No. 10, GWP, Stockholm, Sweden.

Krause, P., Kralish, S. y Flügel, W.-A. (2005), Preface, Model integration and development of modular modeling systems, *Advances in Geosciences*, 4: 1-2.

Lanini, S., Courtosis, N. Giraud, F., Petit, V. y Rinaudo, J. D., (2004), Socio-hydrosistem modeling for integrated water-resources management – the Hérault catchment case study, southern france, *Environmental Modelling & Software*, 19: 1011-1019.

Silberstein, R. P. (2005), Hydrological models are so good, do we still need data?, *Environmental Modelling & Software*, article in press.

World Water Council - Comisión Nacional del Agua, (WWC-CNA), (2006), Eje Temático 2. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Documentos Temáticos, IV Foro Mundial del Agua, México, D. F. Pp: 55-82.

Xu, C-Y., (2002), The Methodology of Model Evaluation, Chapter 6, in *Hydrologic Models*, Text Book, Uppsala University, Sweden, pp. 6-1:6-29.