

# Programa de desarrollo de modelos hidrodinámicos de acuífero del Estado de Guanajuato

Por: Adolfo Chávez , Adán Pinales , Ricardo Ducoing , Gerónimo Llerar y José L. Cruz

Adolfo Chávez Rodríguez, es Doctor en Hidrología y Recursos Hídricos por la Universidad de Arizona, E.U.A. Es precursor en México en el uso del conocido código de simulación hidrodinámica MODFLOW, en la aplicación de la técnica de funciones de respuesta para la administración de acuíferos regionales, en el uso de métodos geoestadísticos para la estimación de variables hidrogeológicas y, particularmente, en la aplicación y desarrollo de técnicas de modelación inversa de sistemas hidrológicos, tema en el que ha publicado artículos científicos de nivel internacional. achavezr@avantel.net

El Dr. Adán Pinales Munguía tiene su Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados; la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos de las Zonas Áridas en la Universidad Autónoma de Chihuahua, y la licenciatura en Ingeniería Civil, en la Universidad de Colima. Sus áreas de especialidad son: Hidrología Subterránea, Hidrología de Cuencas, Modelación Matemática de Sistemas Acuíferos, Diseño de Redes de Monitoreo y Diseño de Códigos de Computadora para la Simulación Matemática de Acuíferos. pinalesm@yahoo.com.mx

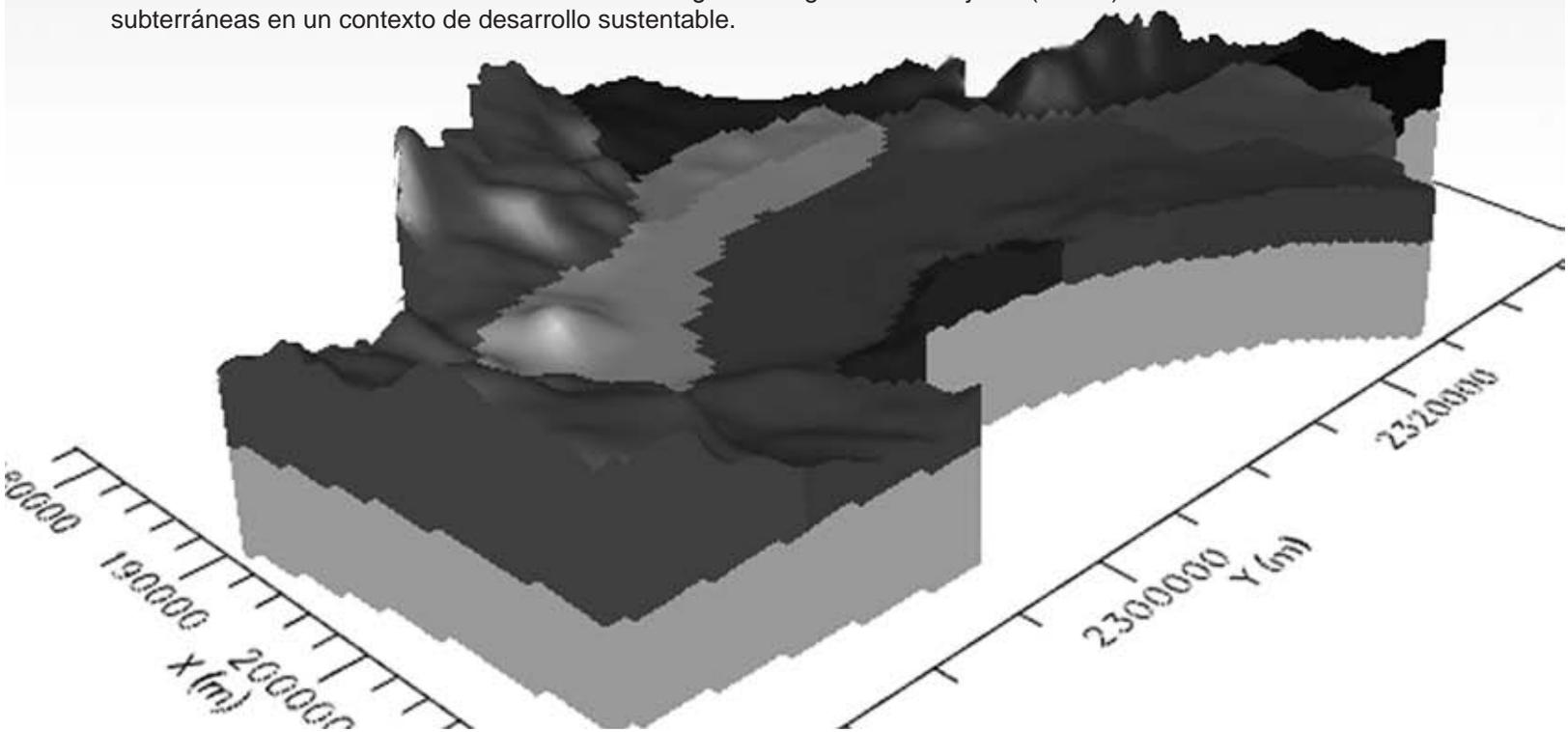
Ricardo Ducoing Castillo es Ingeniero Civil, egresado de la Universidad de Guanajuato. Ha participado en la supervisión, desarrollo y actualización de los Modelos de Simulación Hidrodinámica y los Sistemas de Evaluación de Políticas de Uso Sustentable de Acuíferos que la CEAG tiene a su cargo. Ha participado en el desarrollo y planteamiento de los planes de manejo de los acuíferos en la CEAG. Forma parte del equipo de trabajo que adaptó y desarrolló la metodología de Auditorías de los Modelos Matemáticos (para los modelos Mexicanos), Actualmente se desarrolla como Jefe del Departamento de Modelos para la Planeación en la CEAG. rducoing@guanajuato.gob.mx

Gerónimo Llerar Ingeniero Civil egresado del Instituto Tecnológico de la Paz, B.C. Sur, Mestró en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos en Zonas Áridas por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Actualmente doctorando en el área de hidrológica estocástica del programa de doctorado en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, España. Se ha desempeñado en la empresa de consultoría Estudios y Proyectos en Agua Subterránea SA de CV en área de modelación aplicada a sistemas acuíferos y en proyectos hidrológica subterránea. gelleme@doctor.upv.es

José Luis Cruz José es Ingeniero Geólogo egresado del Instituto Politécnico Nacional. Ha participado en el desarrollo de estudios geohidrológicos y como ponente en congresos nacionales e internacionales de agua subterránea. Actualmente es Director de Estudios y Monitoreo de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. jcrzjos@guanajuato.gob.

En el año de 1995 la entonces Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato (CEASG) se dio a la tarea de realizar o actualizar los estudios hidrológicos e hidrogeológicos en el territorio estatal con el propósito de generar la información y los elementos cuantitativos necesarios para sustentar la elaboración del Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato 2000-2025 que, entre otros objetivos, está encaminado a maximizar el beneficio del uso de las aguas subterráneas en un contexto de desarrollo sustentable.

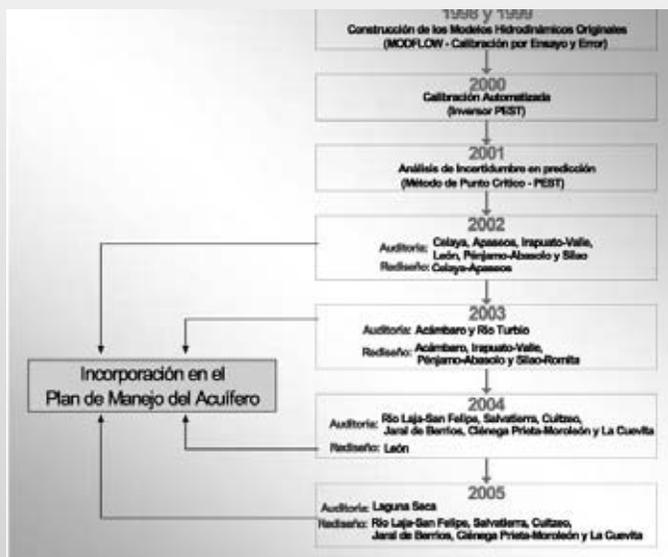
Esta actividad condujo directamente al establecimiento en el año de 1998 del Programa de Desarrollo de Modelos Hidrodinámicos de Acuífero, mediante el cual se construyeron 15 modelos utilizando el bien conocido código de computadora MODFLOW del U.S. Geological Survey. A partir del año 2000, este programa fue ratificado e impulsado intensamente por la ahora Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG).



Los modelos hidrodinámicos de acuífero son insumos para la operación del Sistema de Evaluación de Políticas de Uso Sustentable (SEPUSA), que es un modelo de planeación y de decisión económica que evalúa las acciones propuestas en función de los criterios relevantes para los usuarios del agua de un acuífero. Los modelos hidrodinámicos sirven además para sustentar el diseño y la instrumentación de los Planes de Manejo de los acuíferos, y para realizar predicciones que aporten elementos cuantitativos para la toma de decisiones tocantes a la gestión integrada de los recursos hídricos.

la toma de decisiones relativas al manejo del acuífero, que pudieran ser tomadas para los cortos, medianos y largos plazos.

El uso de los modelos en su modo de gestión es precisamente el enfoque que ha adoptado la CEAG e instrumentado a través del Programa de Desarrollo de Modelos Hidrodinámicos de Acuífero del Estado de Guanajuato. En la Figura 1 se ilustra la evolución histórica de este programa, en donde se advierte que un trabajo continuado a través de los últimos 8 años, en donde se han utilizado las técnicas más modernas para la construcción de los modelos de agua subterránea, tal como la calibración automatizada y el análisis de incertidumbre en predicción, realizadas mediante el conocido código de computadora PEST de Watermark Numerical Computing (Australia).

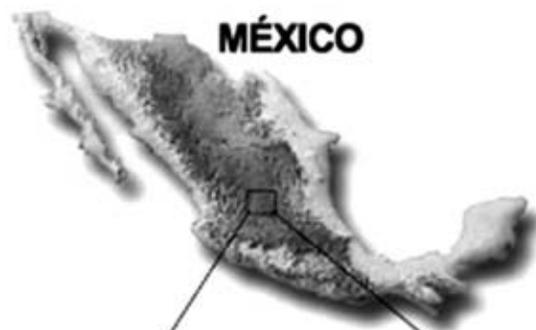


▲ **Figura 1.** Reseña del Programa de Desarrollo de Modelos Hidrodinámicos de Acuífero del Estado de Guanajuato.

Un modelo se puede definir como una representación simplificada de un sistema real o de un proceso, y un modelo matemático como una ecuación o conjunto de ecuaciones que simulan la relación estímulo-respuesta de un sistema.

Los modelos hidrodinámicos son modelos matemáticos que se pueden utilizar para predecir la respuesta los sistemas acuíferos ante estímulos tales como el bombeo en pozos, y para analizar y evaluar las distintas posibles políticas de explotación del agua subterránea, con el fin de seleccionar aquella que produzca el mayor beneficio económico, social y ambiental y que sea viable de implantar con la participación de los sectores usuarios.

En la mayoría de los casos los modelos matemáticos predictivos se han utilizado en el llamado modo de crisis, es decir, el modelo se ha construido para responder a alguna interrogante específica relacionada con alguna decisión administrativa urgente, y una vez que ha servido a este propósito, se archiva o se olvida. Pero un modelo matemático se puede utilizar también en el modo de gestión, es decir, como una herramienta de apoyo para la planeación y la gestión de los recursos hídricos, y en este caso el modelo provee de elementos cuantitativos para



▲ **Figura 2.** Auditoría y rediseño de los modelos de agua subterránea de las principales zonas acuíferas del Estado de Guanajuato

En la Figura 1 se advierte también que desde el año 2002 hasta el 2005 se han realizado las auditorías y los rediseños de los 15 modelos hidrodinámicos. Al respecto, cabe subrayar que cuando un modelo de acuífero se utiliza en el modo de gestión, es decir, como una herramienta de apoyo para la planeación y la administración de los recursos hídricos, se debe desarrollar hasta las etapas de auditoría y rediseño.

La auditoría consiste en comparar la predicción del modelo con el comportamiento observado del acuífero en el mismo lapso, para así examinar la exactitud de las predicciones. Al auditar los modelos de acuífero suelen aparecer discrepancias entre las predicciones del modelo y las observaciones de campo, que en el caso general se deben principalmente a problemas de concepto y con los datos de entrada.



**PROGRAMA DE DESARROLLO DE  
MODELOS HIDRODINÁMICOS DE  
ACUÍFERO DEL ESTADO DE  
GUANAJUATO**

Así, el mayor beneficio de la auditoría consiste precisamente en identificar los errores y/o deficiencias que existan en los modelos conceptuales originales y coadyuvar a determinar la mejor manera de subsanarlos. Estos errores o deficiencias son esperados en todos los modelos matemáticos de acuífero, y su causa principal radica en las limitaciones que imponen los generalmente escasos e inciertos datos de campo en los que descansa la construcción de los modelos.

Además, cuando un modelo de acuífero se emplea para realizar predicciones relacionadas con un problema o con un sistema que sea de un interés continuo para la sociedad, entonces el modelo deberá ser periódicamente auditado, o recalibrado, a fin de incorporar la nueva información que se vaya recabando o generando, tal como la relacionada con los cambios en los esfuerzos hidrológicos actuantes, o bien para realizar adecuaciones en la conceptualización del sistema.

La auditoría conduce a un mejor entendimiento del comportamiento de los sistemas acuíferos y aporta nuevos elementos para el rediseño de los modelos matemáticos. En este proceso también se acrecienta la cantidad de información de campo utilizada y se evalúa mejor su calidad y representatividad, de modo que los modelos auditados y rediseñados alcanzan una mayor confiabilidad y poder predictivo.

En la Figura 2 se ilustra de manera geográfico-temporal la evolución de la realización de las auditorías y los rediseños de los modelos hidrodinámicos en el periodo 2002–2005.

Cabe subrayar que estas auditorías a modelos hidrodinámicos de acuífero son las primeras que se han realizado en México, y la metodología para ejecutarlas ha sido desarrollada y perfeccionada en estos últimos 4 años por la empresa Estudios y Proyectos en Agua Subterránea, SA de CV en colaboración técnica con la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. Esta metodología se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.

Estas auditorías a modelos de agua subterránea son las primeras que se realizan en México, y la experiencia adquirida al auditar los 15 modelos hidrodinámicos de Guanajuato condujo a la formulación de un Protocolo de Auditoría, que ya fue reconocido por expertos del Banco Mundial, el U.S. Geological Survey y las universidades politécnicas de Valencia y Cataluña.

La descripción a mayor detalle de este Protocolo y la síntesis de los resultados de su aplicación en los modelos de Guanajuato será publicada próximamente en un libro editado por el Instituto Geológico y Minero de España.

Finalmente, cabe reconocer que la continuidad de todos estos trabajos de modelación de acuíferos ha sido



▲ **Figura 3.** Protocolo para la ejecución de auditorías a modelos hidrodinámicos de acuífero desarrollado por EPAS-CEAG.

posible en virtud del Programa de Actualización de Mediciones Piezométricas, que la CEAG implantó en el año de 1999, y mediante el cual se han venido realizando estas mediciones en cerca de 1000 pozos de observación en todo el estado de Guanajuato. Estos datos, además de los generados en los estudios hidrológicos e hidrogeológicos que se realizan o actualizan continuamente en la CEAG —y en donde se utilizan cada vez mejores métodos para evaluar las recargas y las extracciones por bombeo— han hecho posible que el Programa de Desarrollo de Modelos Hidrodinámicos de Acuífero del Estado de Guanajuato sea un ejemplo para el país y para el mundo de la manera en que se debe trabajar con los modelos hidrodinámicos de acuífero, para que estos sean cada vez más confiables e incrementen su poder predictivo, y sirvan mejor al propósito para el que fundamentalmente han sido desarrollados, que es el de incorporar lo mejor de la ciencia y la tecnología modernas para maximizar el beneficio económico y social del aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos en el estado de Guanajuato 