

LOS MODELOS MATEMATICOS APLICABLES EN PROBLEMAS DE INTRUSION MARINA DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL USUARIO HIDROGEOLOGO

Resumen

1. Introducción

2. Modelos de flujo

2.1. Modelos quasi-tridimensionales que consideran inmiscibilidad de los flujos

3. Modelos de transporte de solutos

3.1. Modelos de elementos finitos

3.2. Modelos basados en el método de las características

3.3. Modelo "Random Walk"

4. Modelos de simulación de dos fases líquidas miscibles con diferente densidad

4.1. Modelos de elementos finitos

4.2. Modelos de diferencias finitas

4.3. Modelos basados en el método de las características

5. Modelos que simulan reacciones de equilibrio químico y cambio iónico

6. Conclusiones

7. Bibliografía

TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros
Almuñécar (Granada, España). 1988

**LOS MODELOS MATEMATICOS APLICABLES EN PROBLEMAS DE
INTRUSION MARINA DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL
USUARIO HIDROGEOLOGO.**

VIRGOS SORIANO, Luis Ignacio (*)
LOPEZ BRAVO, Juana (**)

Resumen:

Se hace un repaso a los modelos matemáticos más conocidos, describiéndose las ventajas e inconvenientes de unos y otros desde el punto de vista de la experiencia de los autores como usuarios. No se pretende hacer aquí un estudio comparativo objetivo de todos los modelos sino transmitir a la comunidad de hidrogeólogos las ventajas e inconvenientes que unos pocos presentan desde la subjetividad de la experiencia de los autores. Se llega a la conclusión de que los programas, TRECOTT (bi y tridimensional), MODFLOW, MERCER, KONIKOW y SANFORD-KONIKOW pueden ser apropiados en la mayoría de los casos prácticos.

* Investigación y Gestión de Recursos Naturales, S.A. (IGR)
** Instituto Geológico y Minero de España. (I.G.M.E.)

1.- Introducción

En la actualidad existen en el mercado una variada oferta de modelos matemáticos aplicables a distintos problemas de intrusión salina. Tras años de rodaje, aquellos modelos con limitaciones en sus campos de aplicación (p. ej. celdas de mezcla) o inconsistencia en sus planteamientos, cayeron en desuso dando paso a una nueva generación de modelos en los que la exactitud de sus cálculos está suficientemente verificada para todos ellos y a los que se está pidiendo algo más: que sean cómodos de manejar para el usuario hidrogeólogo.

Hoy día, a un modelo matemático se le pide:

- Que sea correcto conceptualmente.
- Que simule todos los fenómenos físicos y químicos relevantes en el problema a tratar.
- Que utilice un algoritmo de cálculo suficientemente preciso.
- Que no sean necesarios cambios de programa para realizar diferentes simulaciones.
- Que la entrada de datos sea cómoda.
- Que suministre sólo la información que se necesita, sin largos listados de resultados.
- Que utilice los datos que corrientemente se tienen del acuífero, y con las unidades habituales de trabajo (que no pida datos que no se miden normalmente).
- En definitiva que esté pensado para ser utilizado por hidrogeólogos y no por informáticos, y por técnicos y no por teóricos.

En general, un modelo que no cumpla los cuatro primeros requisitos será descartado automáticamente en la selección del modelo adecuado para un caso concreto. Serán los otros cuatro requisitos los que condicionarán la decisión final, para la que se valorará muy positivamente la existencia de programas de pre- y postprocesado adecuados.

En los siguientes apartados se hace un resumen de las características de los principales modelos conocidos por los autores, describiéndose las ventajas e inconvenientes que en su opinión presentan unos y otros.

2.- Modelos de flujo

Al igual que en otros acuíferos, los modelos "clásicos" de flujo tienen un campo de aplicación en acuíferos costeros con intrusión marina. Con ellos es posible predecir si en ciertas condiciones se va a producir la intrusión, pero no es posible preverlo con exactitud cuantitativamente.

Conceptualmente los modelos clásicos tienen un inconveniente: no simulan correctamente el flujo en la zona costera, donde se forma una cuña de agua salada. Sin embargo, conocida esta limitación, estos modelos pueden ser utilizados en numerosos casos prácticos.

Los modelos en cuyo uso los autores tienen experiencia son:

- **TRESCOTT bidimensional:** modelo cómodo de manejo y muy versátil para distintos modelos conceptuales del acuífero. Tan sólo el tema referente a extracciones y recargas por lluvia y retorno de riego resulta tedioso. Existen sin embargo versiones (incluso en castellano) que resuelven estos temas con mayor elegancia. En general no se usan programas de pre- y postprocesado.

- **TRESCOTT tridimensional:** la versión original presentaba ciertas limitaciones, y desde luego era más complicada de manejo que el programa bidimensional. Versiones posteriores mejoran considerablemente el programa, pero aún así sigue siendo de manejo complicado, por lo que su utilización solo se justifica cuando el problema físico lo exige.

- **PRICKETT:** existen numerosas versiones de este programa, bidimensionales y tridimensionales. Por lo general todas estas versiones son el resultado de un parcheo continuo adecuando el programa a cada caso particular, por lo que son programas de utilización menos general que el de TRESCOTT. Generalmente, estos programas no están acoplados con programas de preproceso o postproceso, pero son de manejo sencillo e intuitivo.

- **GWSIM:** posiblemente sea éste el programa que más se acerca al hidrogeólogo, en el sentido de utilizar datos de uso común: superficies regadas por concejos, dotaciones, etc. No incluye programas de pre- y postprocesado. Es una versión mejorada del programa de PRICKETT.

- **COOLEY:** utilizable tan sólo para un primer tanteo, aporta la novedad de la calibración automática del modelo por optimización minimocuadrática. Eso sí, su manejo es muy

sencillo incluida la estimación automática de los parámetros. su mayor limitación es la incapacidad de simular el funcionamiento del acuífero en régimen transitorio. Es un modelo ideal con fines didácticos.

- **MODFLOW:** programa tridimensional modular de sencillo manejo. Se dispone en el mercado de programas de pre- y postprocesado, incluyendo rutinas de dibujo con plotter y gráficos en pantalla.

2. 1.- Modelos quasi-tridimensionales que consideran inmiscibilidad de los fluidos.

Estos modelos nacieron de la necesidad de adecuar los modelos de flujo a la problemática de los acuíferos costeros en los que existe una cuña de agua salada. La simulación no es suficientemente precisa para numerosos casos prácticos y en concreto para simulaciones a escala regional.

Basicamente, se trata de considerar que cada celda tiene agua salada hasta un cierto nivel variable y agua dulce por encima de éste, planteando y resolviendo las ecuaciones para las dos fases dulce y salada.

- **MERCER:** Su manejo es relativamente sencillo. Por ejemplo pide la permeabilidad como permeabilidad con agua dulce y no la intrínseca, calculando permeabilidad con agua salada en base a la anterior y a los datos de densidad y viscosidad de una y otra. Es igualmente riguroso y sencillo en lo referente a pozos de bombeo, para los que solicita entre otros datos la profundidad con objeto de calcular exactamente la salinidad del agua bombeada. Es un programa útil para simulaciones a escala regional, pero la versión original no está preparada para simular cambios en la recarga, bombeos, etc. a lo largo del tiempo.

3.- Modelos de transporte de solutos

En la actualidad todos los modelos de transporte de solutos incluyen un modelo de flujo, generalmente simplificado, a fin de simular simultáneamente los fenómenos de flujo y

transporte. Presentan frente al problema de intrusión el problema de no considerar las distintas densidades del agua dulce y salada.

3. 1.- Modelos de elementos finitos.

Presentan todos ellos la característica común de ser complicados de manejo y demasiado teóricos en cuanto al problema real a resolver. Su utilización sólo está justificada en casos muy particulares.

- SUTRA: Tiene la particularidad de poder simular el transporte en la parte no saturada del acuífero. Su utilización es muy tediosa pero existe en el mercado un programa de preprocesado. La entrada de datos está preparada en términos matemáticos más que hidrogeológicos, por lo que requiere un cierto esfuerzo de adaptación.

3. 2.- Modelos basados en el método de las características.

Estos modelos resultan de fácil manejo para el usuario no especialista, no siendo necesarios conocimientos matemáticos especiales para su utilización. Pueden presentar problemas de largos tiempos de ejecución en acuíferos muy heterogéneos, con zonas de alta velocidad del agua (tipo kárstico, por ejemplo).

- KONIKOW: Se trata de un programa extremadamente sencillo. Están muy simplificados tanto el problema de flujo como el de transporte, y las simplificaciones son perfectamente coherentes con los datos que generalmente se tienen en la práctica. Además el programa está pensado para usuarios hidrogeólogos, pidiendo datos como recargas, bombeos, pozos de observación, etc. Por ello este es posiblemente el programa idóneo para una gran mayoría de situaciones prácticas, a lo que contribuye también la existencia de programas de preprocesado y postprocesado.

3. 3.- Modelo "Random Walk".

Un caso especial es el modelo "Random Walk" de PRICKET. El método del paseo aleatorio es una solución

elegante al problema del transporte, y sin duda el que presenta menor dispersión numérica. En el otro lado de la balanza el programa requiere algunas pequeñas modificaciones para simular distintas hipótesis, por lo que es necesario saber algo de informática para manejarlo. El programa es absolutamente riguroso en cuanto a la resolución de las ecuaciones de flujo y transporte. Sin embargo generalmente existen ciertos parámetros cuyo conocimiento es tan sólo aproximado, por lo que esto no es una ventaja -sino más bien una desventaja- frente al modelo de KONIKOW. No se dispone de programas de pre- y postprocesado para este modelo.

4.- Modelos de simulación de dos fases líquidas miscibles con diferente densidad

Son los que resuelven con mayor rigor el problema de la intrusión salina. Se trata sin embargo en muchos casos de modelos que simulan únicamente un perfil vertical, lo que limita su campo de aplicabilidad a estudios muy locales.

4. 1.- Modelos de elementos finitos:

Por lo general los modelos de elementos finitos que simulan el transporte de solutos son capaces de reproducir diferentes cambios de densidad con la salinidad, y en concreto el sutra, ya comentado en el apartado 3-1.

4. 2.- Modelos de diferencias finitas:

- INTERA.- Versión mejorada del modelo desarrollado por INTERCOMP Resource Development and Engineering, Inc. para el U.S. Geological Survey. Es un modelo totalmente tridimensional, ideado para simular el comportamiento de residuos contaminantes, radiactivos o no, almacenados en formaciones salinas. Es perfectamente aplicable a supuestos de intrusión marina, pero dado que su finalidad es mucho más general

resulta de tedioso manejo.

4. 3.- Modelos basados en el método de las características:

Presentan las mismas ventajas e inconvenientes que los modelos de transporte de solutos basados en el mismo método y comentados en el apartado 3.2.

- **SANFORD-KONIKOW:** Este programa es descendiente del comentado en el capítulo 3.2 de KONIKOW. Simula el transporte de un soluto que controla la densidad del agua (el TSD) y otro soluto traza cuyo movimiento se quiere visualizar (p.ej. el ión nitrato), lo que lo hace especialmente apto para la simulación de problemas de contaminación en acuíferos costeros. Su manejo es, gracias a la simplificación del fenómeno físico, más sencillo que el de los modelos comentados en los apartados anteriores. No obstante sigue siendo algo complicado para los hidrogeólogos clásicos, no habituados a manejar datos como permeabilidad intrínseca, viscosidad, relación que liga la densidad con el total de sólidos disueltos, presiones en lugar de niveles piezométricos, etc. El programa está preparado para trabajar con libras y pies, pero es sencillo cambiarlo para trabajar con Kg y m.

5.- Modelos que simulan reacciones de equilibrio químico y cambio iónico

La simulación, simultánea al modelo de flujo y transporte, de las reacciones de equilibrio químico de todos los constituyentes del agua para todas las celdas, no es operativa debido a los altos tiempos de ejecución con los ordenadores actuales.

Generalmente se prefiere simular primero el flujo y transporte y después, por separado, utilizar alguno de los programas de equilibrio químico existentes (EQUIL-T, WATEQ 2, PHREEQE, MINTEQ, EQ3/6, etc) para estudiar los cambios químicos que se producen en el proceso de intrusión.

Existen sin embargo un pequeño número de programas que abordan directamente este problema, aunque de una manera

simplificada.

- **SATRA-CHEM:** Modelo de elementos finitos, versión simplificada del SUTRA. Resuelve las ecuaciones de flujo y transporte además de simular reacciones de equilibrio químico entre fases disueltas y adsorción o cambio iónico con las formaciones acuíferas. El manejo del modelo es tedioso pero sencillo, aunque hay puntos no suficientemente explicados en la documentación. En simulaciones realizadas con un ordenador HP-9000 se encontraron problemas de direccionamiento, que provocaban la caída del sistema.

6.- Conclusiones

Tras hacer un repaso a los modelos más conocidos, se llega a la conclusión de que no existe un modelo completo y adecuado a una gran mayoría de casos. Los modelos que simulan adecuadamente el flujo, permitiendo un acuífero complejo, con ríos y manantiales, etc, no simulan dos fases con diferente densidad, y los que hacen esto simulan tan sólo simplificadaamente el modelo de flujo.

Como modelos de flujo a escala regional los programas TRECOTT, MODFLOW, o incluso alguna versión mejorada del de PRICKETT se consideran adecuados en la mayor parte de casos prácticos, pese a su limitación por no simular la fase salada.

Si el proceso de intrusión es manifiesto puede ser más aconsejable la utilización del programa MERCER, con alguna modificación en su caso para adecuarlo al problema concreto.

Los modelos de transporte de solutos bidimensionales "clásicos" presentan el mismo problema que el TRECOTT y MODFLOW, es decir no simulan la diferente densidad del agua dulce-salada. Por ello no son aplicables en la simulación de la intrusión, salvo en casos particulares y con ciertas reservas. Si son utilizables por el contrario para la simulación de otros contaminantes en acuíferos con intrusión, siempre que se adopten las necesarias medidas correctoras.

Como modelo para simulación del proceso local de intrusión en un perfil vertical, el programa de SANFORD se presenta suficientemente cómodo para el hidrogeólogo, dentro

de la complejidad que este tipo de modelos presentan.

El resto de modelos comentados en esta comunicación son en la humilde opinión de los autores de manejo más complicado, por lo que su empleo queda restringido a casos muy particulares en los que los programas anteriores no son utilizables.

7.-Bibliografía

- Bonnet, Santy (1975). Un modele simplifié pour la simulation des nappes avec intrusion saline. AIHS Symposium-Application of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems, Bratislava, AIHS Publication No.115. 9p.

- Cooley (1977). A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady-state ground-water flow, 1- Theory and numerical properties. Water resources Research, V. 13, No.2, pp. 318-324.

- Cooley (1979). A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady-state ground-water flow, 2- Application of statistical analysis. Water Resources Research, V. 15, No.3, pp. 603-617.

- Cooley, Naff (1985). Regression Modeling of ground-water flow. USGS.OFR 85-180.

- IGME (1985-86). Aplicaciones prácticas de los modelos de calidad de los acuíferos. División de Aguas Subterráneas y Geotecnia del Instituto Geológico y Minero de España.

- Intera Enviromental Consultants, Inc. (1979). "Revision of the documentation for a model for calculating effects of liquid waste disposal in deep saline aquifers", USGS-WRIR 79-76, 72p.

- Intercomp Resource Development and Engineering, Inc (1976). A model for calculating effects of liquid waste disposal in deep saline aquifers. USGS-WRI 77-49, 62p.

- Konikow, Bredehoeft (1978). Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. USGS-TWRI, Book 7,Chap. C2, 90p.

- Lewis, Voss, Rubin (1987). Solute transport with equilibrium aqueous complexation and either sorption or ion exchange: simulation methodology and applications. Journal of Hydrology, 90, pp 81-85.

- Mercer, Larson, Faust (1980). Simulation of salt-water interface motion. Groundwater, V. 18 n. 4.

- Pinder, Cooper (1970). A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front. Water Resources Research, V.6, n.3, p. 875-882.

- Prickett, Lonquist (1971). Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois Water Survey Bulletin 55, 62p.

- Trescott (1975). Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground water flow. USGS-OFR 76-438, 32p.

- Trescott, Pinder, Larson (1976). Finite-difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. USGS, TWRI, Book 7, Chap. C1, 116 p.

- Sanford, Konikow (1985). A two-constituent solute-transport model for ground-water having variable density. USGS-WRIR 85-4279.

- Segol, Pinder, Gray (1975). A galerkin finite-element technique for calculating the transient position of the saltwater front. Water Resources Research, V. 11, No. 2, pp. 343-347.

- TWDB (1974). Program Documentation and Users Manual, GWSIM, Groundwater Simulation Program.

- Voss (1984). SUTRA: A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. USGS-WRIR 84-4369, 409 pp.