

## Nuevo libro sobre modelado de sistemas geotérmicos

*Luis C.A. Gutiérrez-Negrín*

---

**E**n abril de 2010 se publicó un nuevo libro sobre modelado numérico de sistemas geotérmicos (y de agua subterránea). Este nuevo libro, escrito en inglés, se titula “*Introduction to the numerical modeling of groundwater and geothermal systems*” (Introducción al modelado numérico de sistemas geotérmicos y de agua subterránea), y se anuncia que presenta “los fundamentos del transporte de masa, energía y solutos en rocas poro-elásticas”. Está escrito por J. Bundschuh y M.C. Suárez-Arriaga, y fue publicado en Holanda por CRC Press, división del Taylor and Francis Group como parte de su serie Multiphysics Modeling. Su registro ISBN es 978-0-415-40167-8.

Jochen Bundschuh es un investigador alemán del Instituto de Investigación Aplicada de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Karlsruhe, Alemania, y del Instituto Real de Tecnología (KTH) de Estocolmo, Suecia. Ha escrito al menos un par de libros relacionados con la geotermia como coautor de D. Chandrasekharam, uno de los cuales fue reseñado por Raffaele Cataldi en un número anterior de esta revista (Vol. 22, No. 2, Julio-Diciembre de 2009). Mario César Suárez-Arriaga es un investigador mexicano del Departamento de Matemáticas Aplicadas y Ciencias de la Tierra de la Facultad de Física y Matemáticas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en Morelia, Mich., México. Suárez-Arriaga es también miembro fundador de la Asociación Geotérmica Mexicana y un reconocido experto en modelado geotérmico.

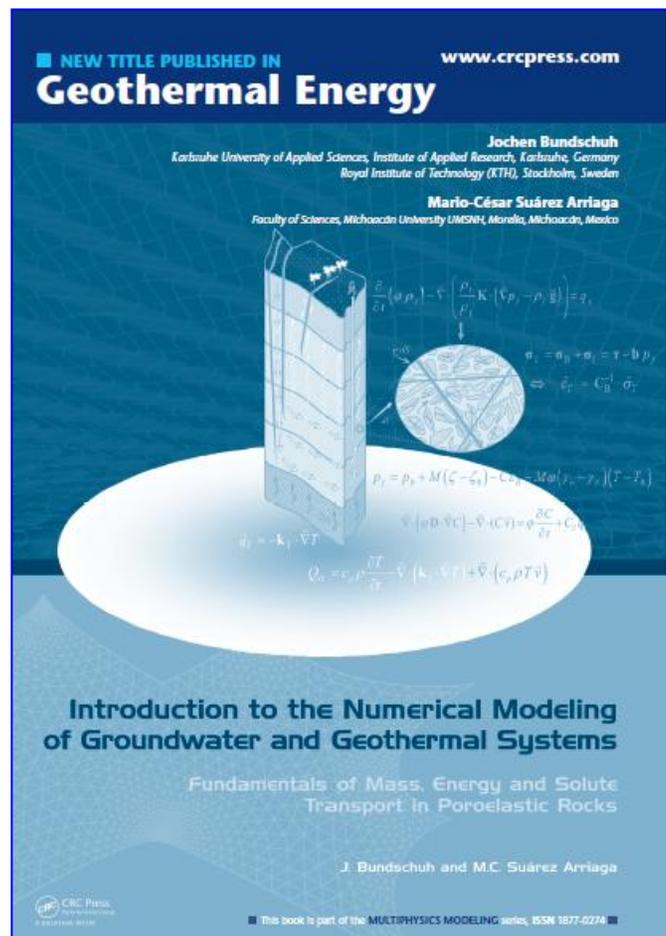
El libro presenta una introducción a los fundamentos de los sistemas geotérmicos y de agua subterránea. Explica los diversos problemas relativos a la energía y al agua contenida en rocas porosas deformables desde un enfoque didáctico y simple. También incluye las herramientas matemáticas y numéricas, y la teoría subyacente, empleadas usualmente para modelar y resolver esos problemas. De esta manera, el lector puede obtener un conocimiento completo de las leyes físicas del flujo de fluidos en rocas que presentan un comportamiento termo-poro-elástico, así como de las ecuaciones diferenciales parciales que representan a esas leyes y los principales métodos numéricos. Esto le permite al lector hallar las soluciones aproximadas de los modelos matemáticos relacionados.

El libro explica cómo se pueden generar y resolver modelos específicos de utilidad. Su carácter introductorio se deriva del hecho de que describe los aspectos básicos de los sistemas geotérmicos y de agua subterránea en tres campos principales: matemáticas, física e ingeniería. Todas las leyes y ecuaciones que se presentan a lo largo del libro fueron cuidadosamente formuladas con base en principios fundamentales de la física, y por tanto el lector es capaz de comprender la importancia de las matemáticas aplicadas a los diferentes temas.

En el libro se presentan y resuelven modelos simples, incluyendo varios ejemplos. También se describen cuidadosamente las técnicas numéricas a utilizar en modelos más sofisticados y avanzados. En ambos casos se enfatiza la interpretación física de las ecuaciones y de los resultados matemáticos.

Se discuten los parámetros y coeficientes que aparecen en acuíferos de tipo isotérmico y geotérmico con base en explicaciones bien desarrolladas y en resultados experimentales documentados. Cuando el libro aborda yacimientos naturales formados por rocas poro-elásticas bajo cambios de presión y de temperatura, introduce gradualmente las leyes de la conservación de la masa, el momento y la energía, y particularmente las dos leyes termodinámicas.

También se presentan los coeficientes que soportan consideraciones teóricas, obtenidos a partir de resultados experimentales, desde un punto de vista práctico, incluyendo una breve descripción sobre cómo se miden en laboratorio tales coeficientes.



El libro expone algunas ideas relativamente nuevas, entre ellas:

- La formulación en cuatro dimensiones de la teoría poro-elástica lineal.
- La deducción de la matriz de ecuaciones termo-poro-elásticas en cuatro dimensiones utilizando los potenciales de Gibbs y Helmholtz.
- Un modelo para estimar el colapso de fallas y fracturas en rocas.
- Ejemplos directos de la termodinámica de rocas porosas.
- Valores numéricos y relaciones de coeficientes poro-elásticos.
- Correlaciones prácticas para acuíferos de baja entalpía y para yacimientos hidrotermales bifásicos.
- Una presentación gráfica de las propiedades del agua y algunos ejemplos de modelos de sistemas geotérmicos y de agua subterránea.

Este libro pretende constituir un compendio sinóptico de los fundamentos del transporte de fluidos, solutos y calor aplicable a todos los tipos de sistemas subterráneos, desde acuíferos someros hasta sistemas hidrotermales profundos. Como tal, seguramente

habrá de ser un útil libro de consulta para estudiantes de pregrado y de grado, postgraduados, geólogos, hidrogeólogos, geofísicos, ingenieros, matemáticos y otros profesionistas de las importantes áreas del agua subterránea y los recursos geotérmicos.

El contenido general del libro es el siguiente:

1. **Introducción:** Problemas del agua y la energía, la visión del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), modelado multi-físico, necesidades del modelado en el contexto socio-económico, la importancia del modelado numérico.
2. **Propiedades de rocas y fluidos:** Propiedades de las rocas porosas, deformación linear termo-poro-elástica incluyendo el coeficiente de Biot-Willis, propiedades del agua.
3. **Propiedades especiales de acuíferos heterogéneos:** El concepto de porosidad múltiple, el concepto de triple porosidad-permeabilidad en sistemas geotérmicos, parámetros promedio, modelos generales de mezcla, aplicaciones de datos de campo, discontinuidad de parámetros en interfaces, propiedades petrofísicas de campos geotérmicos mexicanos (Los Azufres, Los Humeros y Cerritos Colorados) como ejemplos de acuíferos heterogéneos no isotérmicos.
4. **Flujo de fluidos, transporte de calor y de solutos:** Conservación de la masa de los fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes, ley de Darcy, flujo hacia pozos en acuíferos homogéneos, fundamentos

de pruebas de bombeo, ecuaciones de transporte de calor, flujo en yacimientos bifásicos, ecuaciones de transporte de solutos.

5. **Principales métodos numéricos:** Método de diferencias finitas, método de elemento finito (FEM) incluyendo la interpolación polinomial lineal de Lagrange, la ecuación de Poisson y el método de Galerkin, método de volumen finito (FVM), método de elemento de límite para problemas elípticos, incluyendo la distribución de Dirac.
6. **Procedimiento para elaborar un método numérico:** Objetivos de métodos numéricos, modelos conceptuales, tipos y datos de campo necesarios para construirlos, formulación numérica, estimación de parámetros, selección del tipo de modelo y algoritmo (incluyendo los métodos ASM, SUTRA, TOUGH2, COMSOL Multiphysics, NODFLOW y STAR), análisis de sensibilización y calibración, simulaciones numéricas, evaluación de incertidumbres, fallos y errores, ejemplo de construcción de un modelo.
7. **Identificación de parámetros y problemas inversos** (capítulo escrito por Ángel Pérez y Longina Castellanos): planteamiento erróneo del problema inverso, mínimos cuadrados lineales (LLS), mínimos cuadrados no lineales (NLS), ejemplos de aplicación.
8. **Ejemplos de aplicación de modelado de agua subterránea:** Extracción de agua subterránea, intercambio de agua por infiltración, escenario de modelado de acuíferos con capas múltiples, punto de contaminación y remediación de la fuente, contaminación por boro, oscilaciones de la temperatura anual en un acuífero somero estratificado.
9. **Ejemplos de modelado de sistemas geotérmicos:** Energía geotérmica y características de los yacimientos geotérmicos mexicanos, conducción transitoria radial-vertical en pozos, modelo de Avdonin, salmuera geotérmica en yacimientos petrolíferos, potencial y modelado de sistemas geotérmicos submarinos, procesos de modelado en sistemas geotérmicos fracturados, incluyendo modelos de porosidad simple, doble y triple.

**Apéndices matemáticos:** Teorema de aproximación de Karl Weierstrass, interpolación polinomial de Lagrange, teorema integral de Stokes, teorema de Riemann, primera y segunda identidad de Green, teorema de divergencia, distribución de Dirac, tabla de Jochen.

Más información sobre este libro en el vínculo siguiente:

<http://www.crcpress.com/product/isbn/9780415401678>

### ***XVJJJ Congreso Anual (2010) de la Asociación Geotérmica Mexicana***

La AGM realizará su XVIII Congreso Anual y su XVIII Asamblea General el 8 de octubre de 2010 en las instalaciones de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Morelia, Mich., México. Visite el portal de la AGM para ver la convocatoria completa y demás detalles del evento en: <http://www.geotermia.org.mx>.