

Sesión Especial

**Modelación matemática y
computacional en geofísica:
métodos y aplicaciones**

Organizadores:

Ismael Herrera

Víctor Cruz-Atienza

SE09-1

MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN DE DOMINIO: TEORÍA UNIFICADA

Herrera Revilla Ismael
 Instituto de Geofísica, UNAM
 iherrera@unam.mx

Los modelos matemáticos de muchos sistemas de interés, tanto de la Geofísica como de otras ciencias y de las ingenierías, dan lugar a una gran variedad de ecuaciones diferenciales parciales cuyos métodos de solución se basan en el procesamiento computacional de sistemas algebraicos de gran tamaño. Además, la expansión increíble habida en el equipo (hardware) y los códigos (software) computacionales ha permitido el tratamiento efectivo de problemas de una diversidad y complejidad siempre crecientes.

Entre los nuevos recursos computacionales destaca la computación en paralelo, especialmente ahora cuando los aumentos en la rapidez del cómputo que se han logrado en los últimos años se basan en ella. Por eso, desde que surgió la computación en paralelo, hace un poco más de veinte años, la comunidad internacional de especialistas en modelación matemática y computacional ha mantenido un esfuerzo continuado para poner esta herramienta al servicio de su tema de investigación y estudio. En particular, este esfuerzo se ha realizado a través de los métodos de descomposición de dominio, por ser ellos la vía más efectiva para aplicar la computación en paralelo a las ecuaciones diferenciales parciales. En esta plática se presentará una teoría unificada, desarrollada por el autor y sus colaboradores del Grupo de Modelación Matemática y Computacional del Instituto de Geofísica, que además de unificar, simplifica en forma muy importante los esfuerzos de programación, para el desarrollo de los códigos que los utilizan, y el computacional, requerido para su ejecución.

NOTA: El autor es Editor de la revista "Numerical Methods for Partial Differential Equations An International Journal", Wiley, Nueva York.

SE09-2

MÉTODOS DE DESCOMPOSICIÓN DE DOMINIO: EL ALGORITMO "ROUND-TRIP" PARA EL OPERADOR DE ELASTICIDAD EN TRES DIMENSIONES

Contreras Trejo Iván
 Universidad Nacional Autónoma de México
 germanc@uxmcc2.iimas.unam.mx

El operador de elasticidad en tres dimensiones genera un sistema de ecuaciones el cual puede ser resuelto por medio de algún método iterativo.

Se presenta ahora el procedimiento para resolver en paralelo los sistemas de ecuaciones que se obtienen de la discretización de la ecuación de elasticidad. El algoritmo está diseñado para implementarse en máquinas de cómputo en paralelo además de estar precondicionado.

Partiendo de un sistema que se obtiene con algún método de discretización, llámese FEM, Diferencias Finitas o Métodos de Colocación se resuelve el sistema global utilizando el algoritmo Round-Trip, el cual es un método iterativo y consiste en la solución de problemas Dirichlet o Neumann en cada subdominio utilizando

un conjunto de transformaciones lineales obtenidas a partir de la teoría de matrices por tramos. Dichas transformaciones permiten trabajar tanto con funciones continuas como con las discontinuas.

SE09-3

COMPLEMENTO DE SCHUR DUAL PRIMAL DE UN NIVEL Y FETI DUAL PRIMAL DE UN NIVEL

Rubio Acosta Ernesto y Herrera Revilla Ismael
 Universidad Nacional Autónoma de México
 ernesto@uxdea4.iimas.unam.mx

Se presentan dos métodos de descomposición de dominio para subdominios sin traslape, específicamente dos métodos de subestructuración que no requieren el uso de multiplicadores de Lagrange: Complemento de Schur Dual Primal de un nivel y FETI Dual Primal de un nivel [3]. El primero de ellos se plantea como un algoritmo tipo Dirichlet y, el segundo, como uno tipo Neumann.

Ambos métodos se presentan en el contexto de la teoría de ecuaciones diferenciales parciales en espacios de funciones discontinuas definidas por tramos. Esta teoría fue introducida recientemente por Herrera en [1][2]. En este marco teórico, en el cual se puede formular una teoría general de FEM, las discontinuidades de las funciones a través de las fronteras interiores de los subdominios no son una anomalía que necesite ser corregida mediante el uso de multiplicadores de Lagrange. De aquí que una ventaja inmediata de estos métodos es la reducción de los grados de libertad asociados a los multiplicadores de Lagrange.

También relevante, estos métodos son la base para plantear otros métodos de subestructuración Dual Primal de dos niveles, particularmente uno de gran generalidad llamado "Algoritmo de Round-Trip" [3].

El manejo de las funciones discontinuas se hace mediante la introducción de dos matrices de proyección. La primera de ellas es una generalización del operador promedio de funciones y, la segunda matriz es una generalización del operador salto de funciones, ambas aplicadas a nivel discreto. Al parecer, la matriz de salto es la elección óptima para la matriz B del método FETI. De aquí que esta formulación sea de especial interés.

Bibliografía:

- [1] Herrera, "Theory of Differential Equations in Discontinuous Piecewise-Defined Functions", online www.interscience.wiley.com, 2006.
- [2] Herrera, "New Formulation of Iterative Substructuring Methods Without Lagrange Multipliers: Neumann-Neumann and FETI", online www.interscience.wiley.com, 2007.
- [3] Herrera, Yates, "Unified Multipliers-Free Theory of Dual-Primal Domain Decomposition Methods", online www.interscience.wiley.com, 2008.

SE09-4

TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS USANDO FUNCIONES DISCONTINUAS DEFINIDAS POR TRAMOS

Rosas Medina Alberto y Herrera Revilla Ismael

Instituto de Geofísica, UNAM

albertico@mmc.geofisica.unam.mx

Una teoría sistemática y verdaderamente general de los métodos de elementos finitos (FEM) puede ser formulada usando funciones base y de peso, funciones definidas por tramos que pueden ser completamente discontinuas a través de la frontera interna, la cual separa los elementos uno de otro. La teoría algebraica de Herrera para problemas de valores de frontera (BVP), implica un tipo de operadores de extensión de gran generalidad, estos operadores usan funciones de base y de peso completamente discontinuas que pueden ser aplicadas simultáneamente, lo cual esto no es posible cuando se usa la teoría estándar de distribuciones. En este trabajo este aspecto de la teoría es discutido y se muestra que los operadores de extensión implicados por la teoría algebraica, corresponden a extensiones de operadores distribucionales. Más precisamente, en situaciones donde el operador distribucional es definido, este coincide con la teoría algebraica.

Sin embargo como ya mencione, el operador de extensión implicado por la teoría algebraica está bien definido en casos donde la distribucional no lo está. Este es el caso, por ejemplo, cuando las funciones base y de peso son completamente discontinuas.

Tiene interés mencionar que las bases para el tipo de operadores de extensión presentados en este trabajo, es puramente algebraico. El contenido de este trabajo está dedicado a comparar principalmente las extensiones algebraicas con el enfoque distribucional. Gracias a la teoría desarrollada en [1,2] por Herrera, la forma de aplicar funciones completamente discontinuas definidas por tramos en la formulación de los elementos finitos es de una manera sistemática y sencilla. Las fórmulas Green-Herrera son la extensión de las derivadas distribucionales aplicadas a funciones completamente discontinuas.

REFERENCIAS

[1] I. Herrera, Theory of Differential Equations in Discontinuous Piecewise-Defined-Functions, NUMER METH PART D E, 2007, 23:597-639.

[2] Herrera, I. "On Operator Extensions: The Algebraic Theory Approach". Advances in Optimization and Numerical Analysis, (Procs. of VI Workshop on Optimization and Analysis. Oaxaca, Oax. México, Enero, 1992), Mathematics and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, pp. 155-163, 1992.

SE09-5

APLICACIÓN DEL CÓMPUTO PARALELO A LA MODELACIÓN DE SISTEMAS CONTINUOS EN CIENCIA E INGENIERÍA MEDIANTE EL MÉTODO FETI-DP

Carrillo Ledesma Antonio¹ y Herrera Revilla Ismael²¹Facultad de Ciencias, UNAM²Instituto de Geofísica, UNAM

acl@fciencias.unam.mx

Los modelos de los sistemas continuos en ciencias e ingeniería contienen un gran número de grados de libertad y al ser discretizados por medio de algún método numérico generan sistemas de ecuaciones lineales algebraicos de gran tamaño, lo que da lugar a que el tratamiento de sistemas grandes requieran los recursos computacionales más avanzados, en particular, el cómputo paralelo es un recurso indispensable que debe ser aprovechado en este contexto.

La computación en paralelo es una técnica que permite distribuir una gran carga computacional entre muchos procesadores. Y es bien sabido que una de las mayores dificultades del procesamiento en paralelo es la coordinación de las actividades de los diferentes procesadores y el intercambio de información entre los mismos. Los métodos de descomposición de dominio [3] y [4] introducen desde la formulación matemática misma del problema una separación natural de las tareas y simplifican considerablemente la transmisión de información.

La familia de algoritmos FETI (Finite Element Tearing and Interconnecting) y Neumann-Neumann son de los mejor conocidos métodos y más probados para la resolución de ecuaciones diferenciales parciales elípticas. Ellos son métodos iterativos de subestructuración y comparten muchos componentes algorítmicos, tales como soluciones locales para ambos problemas con condiciones de frontera Neumann y Dirichlet sobre las subregiones en donde el problema fue particionado.

Así, en el presente trabajo mostraremos la base de la metodología donde se implementa la solución numérica del método de FETI-DP [4] y [1] de forma paralela usando memoria distribuida bajo el paradigma de programación orientada a objetos, en el lenguaje de programación C++ y la librería de paso de mensajes MPI y veremos la forma de construir el modelo computacional, mostrando los alcances y limitaciones en el consumo de recursos computacionales, así como la evaluación de algunas variantes de los métodos numéricos con los que es posible implementar la solución numérica [2].

REFERENCIAS

[1] J. II. Bramble, J. E. Pasciak and A. II Schatz. The Construction of Preconditioners for Elliptic Problems by Substructuring. I. Math. Comput., 47, 103-134, 1986.

[2] A. Carrillo; Aplicaciones del Cómputo en Paralelo a la Modelación de Sistemas Terrestres (Tesis de Maestría). Instituto de Geofísica, UNAM, 2006.

[3] A. Quarteroni, A. Valli; Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations. Clarendon Press Oxford 1999.

[4] A. Toselli, O. Widlund; Domain Decomposition Methods - Algorithms and Theory. Springer, 2005.

SE09-6

MODELLING SOME EFFECTS OF FAULT GEOMETRY ON RUPTURE DYNAMICS

Cruz Atienza Víctor M.¹ y Virieux Jean²

¹*Instituto de Geofísica, UNAM*

²*Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Université Joseph Fourier, France*

cruz@geofisica.unam.mx

Given the increasing amount of high quality laboratory and earthquake data, more sophisticated models of rupture physics are needed to explain these observations. Several physical factors, as fault geometry, may strongly affect the rupture process. In recent years, theoretical and numerical studies have been devoted to understand the consequences of changes in rupture geometry on both rupture propagation and the associated off-fault (static and dynamic) damage. In this work we assume a slip-independent friction law and focus on effects due to tectonic loading and medium heterogeneities on rupture propagation. Our results show that, under these conditions, fault geometry plays a major role. For instance, the energy partition during rupture propagation is strongly affected.

For this purpose we first introduce a 3D dynamic-rupture numerical model, namely the finite-difference fault-element (FDFE) method (Cruz-Atienza et al., 2007). This method is based on a 3D methodology for applying dynamic-rupture boundary conditions along nonplanar faults within a partly-staggered regular lattice. The fault is discretized by a set of parallelepiped elements in which specific boundary conditions are applied. These conditions operate on the stress tensor, once transformed into a local reference frame that matches the fault geometry. Numerically determined weight functions multiplying particle velocities around each element allow accurate estimates of fault kinematic parameters (i.e. slip and slip rate) independently of the faulting mechanism. Numerical criteria for rupture boundary conditions to model rupture processes accurately were determined experimentally finding consistency with those previously found for the 2D case (Cruz-Atienza and Virieux, 2004). Given a spatial grid step for wave propagation, the number of grid nodes contained in each fault element should be adapted accordingly. The smaller the spatial step the greater the number of nodes should be.

Assuming a Coulomb-like slip-weakening friction law, a parametric study shows that the FDFE method converges toward a unique solution, provided that the cohesive zone behind the rupture front is well resolved (i.e. four or more elements inside this zone). Solutions are free of relevant numerical artifacts for grid sizes smaller than approximately 70 m. We validate the FDFE method by comparing numerical solutions for spontaneous slip-weakening ruptures along planar and nonplanar parabola-shaped faults, with those yielded by an independent semi-analytical boundary integral method. This comparison shows that our finite-difference rupture model, based on a thick-fault source description, is accurate enough to perform these complex simulations. It confirms that finite-difference techniques still represent a viable and reliable way to model earthquake dynamics along nonplanar complexly shaped faults in three dimensions.

References:

Cruz-Atienza, V. M., and J. Virieux, 2004, Dynamic rupture simulation of non-planar faults with a finite-difference approach: *Geophysical Journal International*, 158, 939–954.

Cruz-Atienza, V. M., J. Virieux, and H. Aochi, 2007, 3D finite-difference dynamic-rupture modeling along nonplanar faults: *Geophysics*, 72, SM123–SM137, doi: 10.1190/1.2766756.

SE09-7

IMPLEMENTATION OF INCIDENT PLANE WAVES IN THE SPECTRAL ELEMENT METHOD AND COMPARISON WITH THE METHOD OF FUNDAMENTAL SOLUTIONS IN 2D

Madec Ronan¹, Komatitsch Dimitri¹ y Sánchez Sesma Francisco José²

¹*University of Pau, CNRS and INRIA*

²*Universidad Nacional Autónoma de México*

ronan.madec@etud.univ-pau.fr

The Spectral-Element Method (SEM) is a finite-element method that solves the wave equation in the time domain based on high-degree polynomial interpolation on quadrangular elements in 2D and hexahedral elements in 3D, see for instance Komatitsch et al. (1998,1999). This method is well adapted to the simulation of seismic wave propagation in complex geological models. We show here how to implement plane wave sources P, SV or Rayleigh with any incidence angle for this time-domain method. For the implementation of a SV plane wave source, we will especially treat the case of an incidence angle source over critical angle where inhomogeneous waves appear at the free surface reflection. We also implement absorbing boundary conditions following the ideas of Bielak and Christiano (1984), which is crucial ensure that no significant spurious waves propagate back into the main domain. We validate the method and check its accuracy for the numerical modeling of seismic wave propagation, in particular in order to compute the response of a free surface with topography under the incidence of a plane wave with different angles by comparing the results obtained to the Method of Fundamental Solutions (MFS), which is a new method to solve the wave equation in the frequency domain, see for instance Godinho et al. (2008).

SE09-8

SIMULACIONES A GRAN ESCALA DE LA RESPUESTA SISMICA DEL EJE NEOVOLCANICO Y EL VALLE DE MEXICO

Ramírez Guzmán Leonardo¹, Bielak Jacobo¹ y Contreras Ruiz Esparza Moisés²

¹*Carnegie Mellon University, USA*

²*Disaster Prevention Research Institute*

lramirez@andrew.cmu.edu

El presente estudio resume el análisis de simulaciones numéricas de la respuesta dinámica en la Cuenca de México ante sismos originados en la costa del Pacífico. El modelo de velocidades del suelo concilia diferentes propuestas de la geometría de la subducción, incorpora el Cinturón Volcánico Mexicano y una estructura geotécnica del Valle. Las simulaciones tienen una resolución máxima de 0.66 Hz y una velocidad de ondas S mínima de 60 m/s. Con la finalidad de establecer la influencia de los suelos blandos del lago, se comparan dos conjuntos de escenarios: el primero incluye el Valle de México y segundo excluye dichos depósitos. Las señales calculadas dentro del Eje Neovolcánico experimentan amplificaciones con respecto

a las ubicadas fuera del Cinturón, confirmando las observaciones de Baker et al. (1996). En la banda de frecuencias 0.2-0.5 Hz hay una amplificación adicional dentro del Valle debida a los depósitos lacustres. Las comparaciones entre simulaciones y observaciones son satisfactorias. Como consecuencia se especula que la duración del movimiento en la Ciudad de México es un efecto principalmente local, debido a la forma del Valle y las bajas velocidades del suelo.

SE09-9

CONSERVATIVE FULLY DISCRETE SCHEMES OF ARBITRARY APPROXIMATION ORDER IN SPACE FOR THE SHALLOW-WATER EQUATIONS ON A DOUBLY PERIODIC MANIFOLD AND ON A SPHERE

Skiba Yuri N.¹ y Filatov Denis²¹Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM²Centro de Investigación en Computación, IPN

skiba@servidor.unam.mx

Conservative finite difference schemes of arbitrary approximation order in space are suggested for the shallow-water model (SWM) on a doubly periodic manifold and on a whole sphere. An essential advantage of the method is that it produces fully discrete (both in time and in space) shallow-water schemes that exactly conserve the mass and the total energy and whose numerical implementation is computationally inexpensive [1]. Our approach is based on splitting of the SWM operator by coordinates and by physical processes. As a result, the solution to the original system of 2D partial differential equations reduces to the solution of three simple problems containing either 1D partial differential equations or ordinary differential equations. In fact, an infinite family of such conservative schemes is proposed, which are either linear or nonlinear depending on the choice of certain scheme parameters. On a doubly periodic manifold (for example, in a doubly periodic domain on the plane or on a 2D torus), the method allows constructing conservative finite difference schemes of arbitrary approximation order in the spatial variables. Moreover, if the SWM is considered on the entire sphere (which is not a doubly periodic manifold), the application of various geographical coordinate maps for the solution of split problems allows using the same numerical schemes and algorithms (of arbitrary approximation order in space) as for a doubly periodic manifold [2]. The numerical SWM algorithms are computationally cheap, because each scheme is easily realized by fast direct methods of linear algebra. The skill of the schemes and algorithms is illustrated by numerical results [3].

References:

[1] Skiba Yu.N. and D.M. Filatov (2007). On splitting-based mass and total energy conserving arbitrary order shallow-water schemes. *Numerical Methods for Partial Differential Equations* (Wiley & Sons), 23 (3), 534-552.

[2] Skiba Yu.N. and D.M. Filatov (2008). Conservative Arbitrary Order Finite Difference Schemes for Shallow-Water Flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics* (Elsevier), 218 (2), 579-591.

[3] Skiba Yu.N. and D.M. Filatov (2008). Mass and energy conserving fully discrete schemes for the shallow water equations. Chapter in: "Energy Conservation: New Research" (Frank Columbus, ed.), Nova Science Publishers, New York (aceptado).

SE09-10

BEHAVIOUR OF SOLITON-LIKE WAVES GENERATED BY TOPOGRAPHY IN THE SHALLOW-WATER MODEL

Filatov Denis¹ y Skiba Yuri N.²¹Centro de Investigación en Computación, IPN²Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

denisfilatov@gmail.com

A new numerical method for the simulation of shallow-water flows is developed. A substantial benefit of the method is that it produces fully discrete (both in time and in space) shallow-water schemes that exactly conserve the mass and the total energy and whose numerical implementation is drastically cheap (cf. [1], see also [2]). The virtue of the developed schemes is illustrated via simulation of nonlinear soliton-like waves generated by a model topography [3]. The numerical experiments include testing several finite difference schemes and comparison of their skill on grids of different resolution. The primary attention is given to the study of time-space structure of the numerical solution. Temporary behaviour of the potential enstrophy as an important integral characteristic of the schemes' skill in all the experiments is examined.

KEYWORDS: Shallow-water equations, solitary waves, operator splitting, conservative finite difference schemes, nonlinear interaction.

REFERENCES

[1] R. SALMON, Poisson-Bracket Approach to the Construction of Energy- and Potential-Enstrophy-Conserving Algorithms for the Shallow-Water Equations, *J. Atmosph. Sci.*, 61 (2004) 2016-2036.

[2] YU.N. SKIBA AND D.M. FILATOV, On Splitting-Based Mass and Total Energy Conserving Arbitrary Order Shallow-Water Schemes, *Numer. Meth. PDEs*, 23 (2007) 534-552.

[3] YU.N. SKIBA AND D.M. FILATOV, Mass and Energy Conserving Fully Discrete Schemes for the Shallow-Water Equations, in: F. Columbus (ed.), *Energy Conservation: New Research*, Nova Science Publishers, USA, accepted for publication.

SE09-11

GROUNDWATER TRANSPORT USING DOMAIN DECOMPOSITION METHOD AND COLLOCATION

Hernández García Guillermo

Instituto de Geofísica, UNAM

ghdez@geofisica.unam.mx

A mathematical and numerical model was developed, applying Domain Decomposition Method, DDM, for single-degree of freedom collocation localized method using Hermite polynomials, for the transport in porous media.

The domain decomposition method has been investigated recently by several authors for bi-dimensional and tri-dimensional elliptic and parabolic problems [1, 2]. This method is attractive because it permits parallel processing of finer meshes to approach the domain at transport problems. The collocation method is theoretically simple and exhibits a small discrete error when non-linear approach is needed at non-aqueous phase liquid transport equation [3].

One kind of collocation methods uses Hermite polynomials as its basic functions and approximates the derivatives by some nodal values via finite element approximations such that the nodal values are the only unknowns of interest, and the size of the corresponding linear system is reduced. Numerical tests show convergence of this approach.

REFERENCES

- [1] A. Quarteroni and A. Valli; Domain Decomposition Methods for Partial Differential Equations, Clarendon Press, Oxford, 1999.
- [2] A. Toselli and O. Widlund; Domain Decomposition Methods - Algorithms and Theory, Springer, 2005.
- [3] Li Wu and G. F. Pinder; Single-degree freedom collocation method using Hermite polynomials, Contemporary Mathematics, Vol. 295, pp. 489-499, 2002.

SE09-12

FLUJO BIFÁSICO 3D EN MEDIOS POROSOS

Vera Guzmán Norberto
 Instituto de Geofísica, UNAM
 nrbrt@geofisica.unam.mx

Los modelos mixtos en combinación con los métodos de descomposición de dominio y la simulación numérica en paralelo, constituyen una herramienta muy efectiva para tratar problemas de gran escala, con sistemas estratificados que presentan discontinuidades en sus propiedades físicas.

En este trabajo presentamos un modelo macrohíbrido mixto para simular el flujo de dos fluidos inmiscibles en un medio poroso. El problema es planteado en base a dos modelos mixtos acoplados: velocidad total-presión global y flujo de saturación-saturación. Con base en este enfoque, y utilizando aproximaciones de elemento finito mixto y algoritmos de punto próximo en paralelo, se construye un modelo 3D para simular flujo bifásico.

SE09-13

REVISIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS Y COMPUTACIONALES DE ACUÍFEROS SEMICONFINADOS

Cruz Pliego Miguel Angel, Herrera Revilla
 Ismael y Hernández García Guillermo
 Instituto de Geofísica, UNAM
 macp007@hotmail.com

Cuando a un acuífero le sobrepasa un acuitado se le denomina acuífero semiconfinado (Leaky aquifer). Bajo ciertas condiciones al despresurizar el acuífero debido a la extracción intensiva del recurso hídrico el acuitado comienza a aportar agua al acuífero produciéndose el abatimiento del nivel freático en el acuitado. Dicho fenómeno genera también el fenómeno de subsidencia.

El modelo matemático que describe el flujo no estacionario en un acuífero semiconfinado, suponiendo que existe únicamente flujo bidimensional en el acuífero y flujo vertical en el acuitado, consiste en dos ecuaciones diferenciales parciales, las cuales se encuentran acopladas. La solución de dichas ecuaciones diferenciales da como resultado el abatimiento tanto en el estrato

acuífero como en el acuitado en cada paso de tiempo. Utilizando dichos resultados se puede calcular el fenómeno de subsidencia.

Existen diversos métodos para resolver el modelo matemático de un acuífero semiconfinado. Hantush [1] fue el primero en resolver el modelo de manera analítica utilizando tanto la transformada de Laplace como la transformada de Hankel. Posteriormente Neuman – Witherspon [2] en 1968 hicieron una formulación que permite resolver el modelo numéricamente. Herrera [3] en 1969 desacopló las ecuaciones diferenciales mediante la teoría Integrodiferencial. Con esta teoría se puede resolver la ecuación de flujo en el acuífero en cada paso de tiempo de manera independiente utilizando el Método del Elemento Finito (FEM) o el Método de Diferencias Finitas y utilizar dichos resultados para calcular los abatimientos en el acuitado. A su vez dicha teoría permite reducir de manera considerable los recursos computacionales en la solución del modelo.

El objetivo del trabajo es hacer una revisión de los métodos existentes para resolver el modelo matemático de un acuífero semiconfinado y generar un programa que permita predecir el fenómeno de subsidencia.

REFERENCIAS

- [1] Hantush, M.S., "Modification of the theory of Leaky aquifers", J. Geophys Res., 65,3713-3726,1960.
- [2] Herrera, I., and Figueroa, G.E., "A correspondence principle for theory of leaky aquifers," Water Resour, Res, 5, 900-904, 1969.
- [3] Neuman, S.P. and Witherspon, P.A., "Theory of flow in confined two aquifer system," Water Resour Res., 5,803-816,1969.

SE09-14

ESTUDIO SISTEMÁTICO DE LAS DISCONTINUIDADES QUE OCURREN EN LA MODELACIÓN DE YACIMIENTOS PETROLEROS

Olvera Gómez Alfredo y Herrera Revilla Ismael
 Instituto de Geofísica, UNAM
 lancelot@ciencias.unam.mx

En una serie de artículos [1], [2] y [3] los autores han investigado las diferentes clases de choques que pueden ocurrir cuando se modela yacimientos petroleros y los modelos numéricos disponibles que existen para la solución de estos. Este trabajo está enfocado a resumir los procesos en cuales se generan dichos choques.

Los choques, son cambios muy rápidos tanto en la presión como en otras propiedades del fluido, los cuales en los modelos en que se desprecia la viscosidad, se simulan con discontinuidades. El principal objetivo de este trabajo es identificar los diferentes procesos de generación de choques que ocurren en flujo multifásico, en este proceso de búsqueda se han identificado, dos diferentes procesos que generan choques, el primero tiene lugar en el desplazamiento insoluble y esto sucede cuando en la solución de las ecuaciones existe intersección en las características, por otro lado el segundo caso toma en el desplazamiento parcialmente soluble en este caso hay intercambio de masa entre las dos fases esto sucede por ejemplo en yacimientos que contienen aceite y gas, donde la variable de punto de burbuja esta presente en el gas, en la mayor parte de la región modelada.

Algunas veces la fase de producción primaria en un yacimiento petrolero, basada únicamente en su presión interna, finaliza

rápido dejando un porcentaje muy alto de hidrocarburos en el subsuelo. La ecuación de Buckley-Leverett modela flujos bifásicos, es decir modela la dinámica de fluidos compuesto por dos tipos diferentes de sustancias (desplazamiento insoluble agua-aceite). Una posible aplicación de esta ecuación se encuentra en la modelación de la recuperación primaria de yacimientos petroleros.

REFERENCIAS

[1] Herrera, I. , A. Galindo and R. Camacho. , Shock Modelling in Petroleum Engineering, Chaper 7 of the book Computational Methods for Moving Boundary Problems in Heat and Fluid Flow, L.C. Wrobel Ed, Computational Mechanics publications, 1993.

[2] Herrera I. A. Galindo and R. Camacho. , Shock Modelling in Variable Bubble Point Problems of petroleum Engineering”, Computational Modelling of Free and moving Boundary problems, Vol. 1: Fluid Flow, Eds. L.C. Wrobel and C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publication, pp. 399-415, 1991.

[3] Herrera I. A. Galindo R. Camacho. and Chargo, Eurlian-Lagrangian Aproch of modeling of Shock Modelling in petroleum Reservoirs”, June 1992.

SE09-15 CARTEL

MAPAS DE IRRADIACION DIARIA PROMEDIO MENSUAL CON EFECTO DE SOMBREADO POR TOPOGRAFIA PARA MEXICO

Estrada Cajigal Ramírez Vicente

Solartronic, S.A. de C.V.

vestrada@solartronic.com

En este trabajo se presentan los mapas con valores de irradiación global, directa normal, directa, difusa, global inclinada, directa inclinada y difusa inclinada diaria promedio mensual para México, a partir de las mediciones llevadas a cabo por el Servicio Meteorológico Nacional. Para el trazado de los mapas se ha seguido un proceso que toma en cuenta el efecto de sombreado debido a la topografía utilizando el módulo r.sun del sistema de información geográfico Grass. Se han calculado para cada mes y para cada punto de la rejilla de 1 km, los valores diarios promedio mensual de la irradiación.

SE09-16 CARTEL

CONDITIONS FOR GLOBAL ASYMPTOTIC STABILITY OF BAROTROPIC FLOWS ON A ROTATING SPHERE

Skiba Yuri N.

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

skiba@servidor.unam.mx

In this work, the nonlinear dynamics of a two-dimensional incompressible viscous and forced fluid on a rotating sphere is described by the barotropic vorticity equation (BVE). The equation takes into account the linear drag, turbulence and forcing. The turbulent term is represented by a real degree of the Laplace operator so as to show with more precision the role of this degree in the stability problem under consideration. An appropriate norm for perturbations of the basic solution is introduced and an equation describing the evolution of this norm is derived. Finally, two sufficient conditions for the global asymptotic stability of the BVE solution are obtained. These conditions guarantee that the

basic solution is the only attractor of the problem, and hence, the trajectories of all BVE solutions will exponentially tend to this attractor with time.

In a bounded domain on the plane, in the absence of linear drag, a condition for the global asymptotic stability were earlier obtained by Sundström [1] for the basic flow whose stream function had continuous derivatives up to the third order inclusive. The first condition for the global asymptotic stability obtained here generalizes his result to the flows on a rotating sphere when the linear drag is also taken into account. However, in the general case, the solvability theorems proved for the vorticity equation (see, for example, [2, 3]) do not guarantee the existence of the solution whose third or higher derivatives are continuous. For example, if the basic solution is a modon by Tribbia [4], Verkley [5] or Neven [6], subjected to a dissipation but supported by a certain forcing, then its third derivatives are not continuous on the whole sphere, and the Sundström condition cannot be used. The second theorem proved here gives a new global asymptotic stability condition, in which the requirement on the smoothness of basic solution is weakened and is in full accordance with the known solvability theorems. Examples are given for the basic flows having the form of a Legendre polynomial (zonal flow), Rossby-Haurwitz wave and pure dipole modon.

References:

[1] Sundström A., Stability Theorems for the Barotropic Vorticity Equations, Mon. Wea. Rev. 97 (1969) 340-345.

[2] Skiba Yu.N., Mathematical Problems of the Dynamics of Viscous Barotropic Fluid on a Rotating Sphere. VINITI, Moscow, 1989 (in Russian); Indian Inst. Tropical Meteorology, Pune, India, 1990 (in English).

[3] Szeptycki P., Equations of Hydrodynamics on Manifold Diffeomorphic to the Sphere, Bull. Acad. Pol. Sci., Seria: Sci. Math., Astr., Phys. 21 (1973) 341-344.

[4] Tribbia J.J., Modons in Spherical Geometry, Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 30 (1984) 131-168.

[5] Verkley W.T.M., Stationary Barotropic Modons in Westerly Background Flows, J. Atmos. Sci. 144 (1987) 2383-2398.

[6] Neven E.C., Quadrupole Modons on a Sphere, Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics 65 (1992) 105-126.

SE09-17 CARTEL

DESARROLLO DE UN MODELADO TERMODINÁMICO PARA MITIGAR LA ACIDEZ DEL SISTEMA ACTUAL DEL CAMPO GEOTERMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA, MÉXICO

Tinoco Michel Jorge Armando, González Partida Eduardo y Martínez Reyes José

Centro de Geociencias, UNAM

jatm79@gmail.com

Se presenta un modelo termodinámico - geoquímico basado en la

termodinámica de equilibrio con el fin de estimar el fenómeno de corrosión en el

Campo Geotérmico de los Humeros Puebla y proponer su mitigación.

El modelado se ha convertido en una herramienta muy bien reconocida para

entender los procesos de interacción agua-roca. Sin embargo, en los últimos 40 años, se le ha prestado muy poca atención a los sistemas de interacción roca-agua-GAS en sistemas geotérmicos quizás debido a la complejidad de los cálculos, en este sentido el programa que se ha construido para la CFE es en general, particularmente útil para modelar interacciones geoquímicas en yacimientos geotérmicos, donde el agua es solo una fase más que esta presente junto a la fase de vapor compuesta por mezclas de gases reactivos e inertes.