

Sesión Especial

# **MODELACIÓN MATEMÁTICA Y COMPUTACIONAL DE SISTEMAS TERRESTRES**

Organizadores:

Guillermo Hernández García  
Norberto Vera Guzmán  
Agustín Alberto Rosas Medina

SE04-1

**EL CÓMPUTO EN PARALELO EN LA MODELACIÓN MATEMÁTICA Y COMPUTACIONAL DE LA GEOFÍSICA: UN ESTADO DEL ARTE**

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

Los modelos matemáticos de muchos sistemas de la Geofísica están gobernados por una gran variedad de ecuaciones diferenciales parciales, o sistemas de tales ecuaciones, cuyos métodos de solución requieren procesar computacionalmente sistemas algebraicos sumamente grandes. Es por ello que la increíble expansión de los recursos computacionales que en forma continuada ha venido ocurriendo ha conllevado un aumento también asombroso de la capacidad para modelar matemática y computacionalmente sistemas geofísicos cada vez más diversos y complejos. Entre las nuevas herramientas destaca la computación en paralelo, la cual desde muy temprano en su desarrollo ha recibido considerable atención de la comunidad internacional con el propósito de utilizar su extraordinario poder en la solución de las ecuaciones diferenciales parciales de la Ciencia y la Ingeniería. Idealmente, el objetivo deseable con este propósito sería desarrollar software 100% paralelizado y de aplicabilidad universal; con mayor precisión: software tal que los múltiples procesadores trabajen en forma independiente, sin coordinación alguna y sin intercambio de información, y que sea aplicable a toda clase de ecuaciones diferenciales, o sistemas de tales ecuaciones, independientemente del problema que las origine. En este esfuerzo muy pronto se reconoció que los métodos de descomposición del dominio (DDM, por sus siglas en inglés) son la vía más efectiva para acercarse a este propósito. En esta plática se presentan en forma integrada los logros más importantes alcanzados hasta ahora y, en particular, cuatro algoritmos introducidos recientemente por el GMMC-IGF –los algoritmos DVS- que casi (en la plática se precisa este término) alcanzan el objetivo de ser 100% paralelizables y de aplicabilidad muy general. Estos algoritmos exhiben el poder de un nuevo marco teórico introducido por el autor y sus colaboradores, cuya denominación en inglés es: ‘the derived-vector space (DVS)’, el cual también se explica en esta plática. La posibilidad de tratar en paralelo problemas no simétricos es especialmente relevante en la modelación de los procesos de transporte que ocurren en los sistemas terrestres.

SE04-2

**FOUR MASSIVELY PARALLEL ALGORITHMS FOR GEOPHYSICS APPLICATIONS: IMPLEMENTATION ISSUES**

De la Cruz Luis M.  
 Instituto de Geofísica, UNAM  
 luiggix@gmail.com

Nowadays parallel computing is ubiquitous and almost all new computational resources contain more than one processing unit. The challenge is to develop efficient parallel codes to take advantage of the current parallel architectures. Domain decomposition methods (DDM) allow us to model macroscopic geophysics systems applying effective parallel algorithms, and in particular, the non-overlapping methods can achieve a higher level of parallelization. Recently, Herrera et al. [1-3] have developed four general purpose algorithms that are very suitable for efficiently programming the powerful parallel computers available at present. These new algorithms have been derived in the realm of the DVS-framework [1-3]. The numerical and computational issues, as well as some examples of application are presented in this talk. From the point of view of software engineering, the DVS-framework offers a general platform which give us a natural separation of the concepts and operations, that results in general, efficient and elegant codes. In this implementation we use the Finite Volume Method (FVM) to obtain the numerical model [4]. We apply object oriented and generic programming paradigms in order to generate several generic units that in turn can be used to construct the codes for the algorithms of DVS. These algorithms are iterative in nature, and are based on some well known Krylov methods, to say CGM, GMRES on some others. Finally, we present some parallel metrics that measure the speedup and efficiency of our implementations, for various applications.

- [1] Herrera, I. et al. Geofísica Internacional, 50, pp 445-463, 2011.
- [2] Herrera, I. et al. NUMER. METH. PART D. E. 27, pp. 1262-1289, 2011.
- [3] Herrera, I. et al. NUMER. METH. PART D. E. 26, pp. 874-905, 2010.
- [4] de la Cruz, L.M., and Ramos, E., Trans. on Math. Soft., submitted in 2011.

SE04-3

**CUATRO ALGORITMOS MASIVAMENTE PARALELOS PARA MATRICES SIMÉTRICAS, NO-SIMÉTRICAS E INDEFINIDAS: APLICACIONES A UNA SOLA ECUACIÓN**

Rosas Medina Agustín Alberto y Herrera Revilla Ismael  
 Instituto de Geofísica, UNAM  
 albertico@geofisica.unam.mx

Un conjunto de cuatro algoritmos de propósito general que son muy adecuados para la construcción del software que se requiere para la programación eficientemente de las computadoras paralelas más potentes disponibles en la actualidad fue introducido y explicado en [1-3]. Tales algoritmos son igualmente aplicables a una sola ecuación diferencial parcial y para sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. En el presente trabajo se muestran aplicaciones de los cuatro algoritmos a una sola ecuación. Todos los algoritmos considerados fueron derivados de los métodos de descomposición de dominio no traslapados con restricciones usando el marco del espacio derivado de vectores (DVS), introducido recientemente [1-3], y son aplicables a matrices simétricas, no-simétricas e indefinidas. La característica compartida por todos, es que permite hacer estos en forma masivamente paralela, esto es, que la solución global se obtiene por la solución de problemas locales, en cada subdominio de la partición, exclusivamente.

Palabras clave: Algoritmos masivamente paralelos; cómputo en paralelo; DDM no traslapados, DDM con restricciones; BDDC; FETI-DP.

Referencias:

- [1] Herrera, I., Carrillo-Ledesma A. & Rosas-Medina A. A Brief Overview of NonoverlappingDomain Decomposition Methods, Geofísica Internacional, Vol. 50(4), pp 445-463, 2011.
- [2] Herrera, I. & Yates R. A. The Multipliers-Free Dual Primal Domain Decomposition Methods for Nonsymmetric Matrices, NUMER. METH. PART D. E. 27(5) pp. 1262-1289, 2011. DOI 10.1002/Num. 20581. (Published on line April 28, 2010)
- [3] Herrera, I. & Yates R. A. The Multipliers-free Domain Decomposition Methods, NUMER. METH. PART D. E. 26(4) pp. 874-905, 2010, DOI 10.1002/num. 20462(Published on line April 23, 2009).

SE04-4

**CUATRO ALGORITMOS MASIVAMENTE PARALELIZABLES PARA ELASTOESTÁTICA**

Contreras Trejo Iván Germán y Herrera Revilla Ismael  
 Universidad Nacional Autónoma de México  
 germanc@uxmcc2.iimas.unam.mx

Para utilizar los recursos del equipo de cómputo en paralelo existentes actualmente, se requiere hardware masivamente paralelizado.

Existen límites en los niveles de paralelización que se pueden alcanzar y los cuales no pueden ser rebasados. Para los métodos de descomposición de dominio sin traslape la meta es desarrollar algoritmos capaces de obtener una solución global con las solución de problemas locales en cada subdominio de la partición, exclusivamente. Es ampliamente conocido que para este propósito la introducción de restricciones, las cuales son necesarias para tener algoritmos competitivos, constituye una dificultad adicional nada fácil de sortear. Afortunadamente, un conjunto de cuatro algoritmos de propósito general con restricciones que poseen esta característica y que son aplicables a una amplia gama de matrices- simétricas, indefinidas y no simétricas- han sido desarrolladas. Mientras, en la presente plática damos a conocer y explicamos esos mismos cuatro algoritmos masivamente paralelos, que han sido derivados de los originales , para tratar específicamente el sistema de ecuaciones que gobierna el modelo de Elasticidad Lineal.

Todo este desarrollo ha sido llevado a cabo en el marco del espacio derivado de vectores (DVS) introducido recientemente por I. Herrera y colaboradores.

SE04-5

**DIMENSION OF GLOBAL ATTRACTOR IN BAROTROPIC ATMOSPHERE**

Skiba Skiba Iouri  
 Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM  
 skiba@unam.mx

The large-time behavior of solutions to viscous incompressible and forced model of barotropic atmosphere is considered, and the existence of a limited attractive set B that eventually attracts all solutions to the nonlinear barotropic vorticity equation (BVE) is analyzed. Evidently, the geometric structure of attractive set depends on the structure and smoothness of BVE forcing. Particular forms of forcing have been found, which guarantee the existence of a bounded attractive set in a phase space. We note that all steady and periodic solutions (if they exist)

belong to the set B, which contains the maximal BVE attractor. In this work, the existence and boundedness of attractive set were proved for steady forcing of a family of Hilbert spaces. We also show that under certain conditions on the forcing, the maximal BVE attractor coincides with the zero solution.

Estimates of the Hausdorff dimension of global attractor of the BVE subjected in a periodic two-dimensional hypercube to a steady forcing were made by Babin and Vishik (1992), Constantin et al. (1988) and Doering and Gibbon (1991). The main result states that the attractor dimension is finite and limited by the dimensionless generalized Grashof number (Temam, 1988). In case of sphere, the analogous result was obtained by Ilyin (1993).

In this work, simple attractive sets of the BVE under the influence of a quasi-periodic forcing of the complex  $(2n+1)$ -dimensional subspace  $H(n)$  of homogeneous spherical polynomials of degree  $n$  are analyzed. Each such attracting set is a quasi-periodic BVE solution of the subspace  $H(n)$ . The Hausdorff dimension of its trajectory, being an open spiral densely wound around a  $2n$ -dimensional torus in  $H(n)$ , equals to  $2n$ . As the generalized Grashof number  $G$  becomes small enough, the basin of attraction of spiral solution will expand from  $H(n)$  to the whole phase space, that is, it becomes a global attractor. It is shown that for given  $G$ , there exists an integer  $n(G)$  such that each spiral solution generated by a forcing of  $H(n)$  with  $n$  larger or equal to  $n(G)$  is globally asymptotically stable. Thus, whereas the Hausdorff dimension of attractor of the BVE subjected to a steady forcing is limited from above by Grashof number  $G$ , the Hausdorff dimension  $2n$  of globally attractive spiral solution may become arbitrarily large as the degree  $n$  of quasi-periodic forcing grows.

It should be noted that unlike a time-invariant forcing, a quasi-periodic forcing more adequately describes the effects of small-scale baroclinic processes in the BVE, and therefore this result is of a meteorological interest, showing that the dimension of the global BVE attractor can be unlimited even if the generalized Grashof number is limited, and hence, the dimension of global attractor crucially depends not only on the generalized Grashof number, but also on the spatial and temporal structure of forcing. This example also shows that the existence of finite-dimensional global attractor in the barotropic atmosphere is not well justified, and as a result, the search of finite-dimensional global attractor in meteorological data is unreasonable.

SE04-6

#### A FORMULATION BASED ON THE ADJOINT EQUATION TO ESTIMATE THE EMISSION RATE OF A NON-STEADY POINT SOURCE

Parra Guevara David y Skiba Yuri N.  
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM  
pdavid@atmosfera.unam.mx

Atmospheric transport and dispersion models are used to assess the impact of emission sources on air quality for varying meteorological conditions. These models are also used at nuclear and chemical plants for emergency response and impact assessments for hazardous substances accidentally released into the atmosphere. Besides their direct application, such models are fundamental for solving such inverse problems as the assessment of the air pollution problem parameters. In this work, the inverse problem consists in evaluating unknown sources of the atmospheric pollutants by using a given set of measured concentrations. The solution of this problem can be used to estimate and verify emission inventories of many toxic and radioactive species as well as to detect unknown sources of atmospheric tracers. In particular, the detection and location of nuclear testing or terrorism-related events can be achieved using observations of radionuclides in the atmosphere [3].

In previous works is often assumed that the intensity of the source is stationary or defined as an impulse in time (explosion). As a result, the developed methods do not cover all the actual events of emissions, and therefore their use is limited [3]. Also, such methods frequently use the analytical solutions of simple dispersion models of pollutants (Gaussian plume models), this limits their application only to the cases of steady conditions of dispersion in the atmosphere [1].

In this work, we formulate a method to assess the emission rate of a non-steady point source by using a three-dimensional dispersion model with time-variable parameters [2], and a set of measured concentrations. Here it is assumed that the location of the source is previously known, for example, by means of satellite detection. This inverse problem is ill-posed and a regularization method is necessary in order to find the solution [1]. It is shown that a regularization based on minimizing the  $L_2$ -norm of the first derivative of the emission rate is useful for this problem. Such procedure is subjected to integral constraints, known as Fredholm integral equations of first kind, which compress the cause-effect phenomenon. The adjoint functions used as kernel in the integral constraints are helpful to exhibit the explicit relation between the emission rate and the anomalies of concentration data. The adjoint model and the duality principle are the key to write the constraints in terms of such functions.

It is shown that both models (direct and adjoint) are well posed in the sense of Hadamard. The discrete problem associated to the proposed regularization is a quadratic programming problem which is solved by the quadprog routine of MATLAB. Numerical examples demonstrate the method's ability.

1. Kathirgamanathan, P., McKibbin, R. & McLachlan, R. I. (2003). Source release-rate estimation of atmospheric pollution from a non-steady point source-Part1. Res. Lett. Inf. Math. Sci., 5, 71-84.
2. Parra-Guevara, D., Skiba, Yu. N. & Pérez-Sesma, A. (2010). A linear programming model for controlling air pollution. International Journal of Applied Mathematics, 23 (3), 549-569.
3. Pudykiewicz, J. (1998). Application of adjoint tracer transport equations for evaluating source parameters. Atmospheric Environment, 32 (17), 3039-3050.

SE04-7

#### A NUMERICAL MODEL OF COASTAL FLOWS IN COMPLEX BAY-LIKE DOMAINS

Skiba Skiba Iouri<sup>1</sup> y M. Filatov Denis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Computación, IPN  
skiba@unam.mx

A new model for the numerical study of coastal shallow-water flows in bay-like domains is suggested. The model involves the method of operator splitting by physical processes and by coordinates. An important advantage of the model compared to others is that it allows accurate simulation of coastal flows in a domain of an arbitrary shape with both closed and open boundaries. Moreover, the computational domain may contain interior parts ('tears') treated as isles in the bay. The model also incorporates irregular bottom topography. Specially constructed approximations of the temporal and spatial derivatives result in second-order unconditionally stable finite difference schemes that conserve the mass and the total energy of the discrete inviscid unforced shallow-water system. The potential enstrophy is bounded and periodic in time. Therefore, the numerical solution, aside from being accurate from the mathematical point of view, appears to be physically adequate, inheriting a number of substantial properties of the original differential shallow-water system. Several numerical tests, with both an inviscid and a viscous model, are presented confirming the skills of the developed model.

Keywords. Coastal shallow-water flows, conservative finite difference schemes, complex computational domain, closed and open boundaries.

References.

1. Skiba, Y. N. (1995). Total energy and mass conserving finite difference schemes for the shallow-water equations. Russ. Meteorol. Hydrology, 2:35-43.
2. Skiba, Y. N. and Filatov, D. M. (2008). Conservative arbitrary order finite difference schemes for shallow-water flows. J. Comput. Appl. Math., 218:579-591.
3. Skiba, Y. N. and Filatov, D. M. (2009). Simulation of soliton-like waves generated by topography with conservative fully discrete shallow-water arbitrary-order schemes. Internat. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow, 19:982-1007.

SE04-8

#### CÓMPUTO DE ALTO RENDIMIENTO IMPLEMENTANDO MODELOS DE ESTIMACIÓN DE REGISTROS PERDIDOS PARA DATOS ATMOSFÉRICOS

Aguirre Salas Gilberto Rubén, Sánchez Gómez Rubén y Salas Serrano Víctor  
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, CUCEI  
ruben.aguirre00@gmail.com

Un problema cotidiano investigando series temporales de cualquier fenómeno natural son los datos perdidos, datos que no se registran en forma cotidiana, o con algún tipo de error de medición. En el caso, analizando datos atmosféricos es común encontrar cantidades considerables de datos con este tipo de conflicto, ya sea por fallas eléctricas, lecturas erróneas, mantenimiento de las estaciones de monitoreo, pérdidas por conflictos de comunicación electrónica o eventualmente por registros negativos que carecen de validez.

Cuando la cantidad de datos perdidos no es importante, comúnmente se resuelve con el promedio, la mediana o bien la lectura observada el mismo día del año anterior. Sin embargo, cuando la cantidad de datos es considerable, se hace necesario un análisis previo para tratar de generar estimaciones adecuadas de los mismos.

En este trabajo se presenta un modelo mixto no lineal, implementado en cómputo paralelo, observando buenos resultados analizando datos perdidos, se muestran valores estimados y análisis de errores para observaciones registradas en las bases de datos de los sistemas automáticos de recolección de datos de las redes automáticas de monitoreo atmosférico instaladas en la Zona Metropolitana del Valle de México y en la Zona Metropolitana de Guadalajara.

SE04-9

**FORMULACIÓN CONTINUA DE YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS: ESTADO ACTUAL Y RETOS FUTUROS**

Camacho Velázquez Rodolfo<sup>1</sup> y Vásquez Cruz Mario<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Subdirección de Gestión de Recursos Técnicos, PEP  
<sup>2</sup>Pemex Exploración y Producción  
 rodolfo.gabriel.camacho@pemex.com

El modelado de Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF) es uno de los principales retos matemáticos de la ingeniería de yacimientos. Además de la matriz rocosa, fracturas naturales y vóculos a diferentes escalas constituyen este tipo de yacimientos. Por tanto, su permeabilidad depende tanto de la conectividad de la red de fracturas y de vóculos, como de la distribución de estos sistemas.

Una de las razones por la cual es importante caracterizar YNF, se debe a que estas formaciones geológicas contienen más del 60% de las reservas remanentes de hidrocarburos a nivel mundial, especialmente los YNF vulgares (YNFV). Por tanto, para caracterizar apropiadamente estos yacimientos a menudo se enfrentan retos mayores con respecto a los encarados en yacimientos homogéneos. Asimismo, la caracterización de YNF es importante durante su etapa de producción primaria para llevar a cabo una explotación eficiente de sus reservas; sin embargo, una caracterización apropiada es aún más importante para procesos de recuperación secundaria y terciaria de hidrocarburos.

Actualmente, en la industria se utiliza cotidianamente una propuesta denominada de "doble porosidad" para modelar YNF e incluso YNFV. Dicho modelo considera básicamente la presencia de matriz y fracturas, suponiendo que estas últimas se encuentran a una sola escala, uniformemente distribuidas e interconectadas. Sin embargo, de acuerdo a lo antes expuesto, varias o ninguna de estas hipótesis es válida. Por tanto, es imperativo disponer de otras alternativas para caracterizar estas heterogeneidades (fracturas y vóculos) de manera más realista.

En base a lo anterior y por su relevancia, en el presente trabajo se discuten los siguientes retos inherentes al modelado de YNF: considerar la terminación parcial del pozo en YNFV, involucrando una frontera inferior dictada por la solución de entrada de agua de acuíferos comunes, utilizar la ecuación modificada de Darcy para flujo radial de un fluido no-Newtoniano en la ecuación de difusión para YNFV, analizar la posibilidad de formación de emulsiones en YNFV productores de aceite pesado con presencia de agua, generar un modelo de pruebas de presión-producción considerando la penetración parcial del pozo en YNF con geometría fractal, proponer una solución analítica para YNFV con fracturas fractales, caracterizar el problema de unicidad en el análisis computarizado, mediante técnicas de Inteligencia Artificial, de datos de presión colectados en YNFV, desarrollar una metodología para pruebas de trazadores en yacimientos homogéneos y doble-porosidad considerando geometría fractal, generar una solución analítica para el análisis de pruebas de presión-producción en sistemas con geometría multifractal, y desarrollar una solución analítica para el análisis del comportamiento de producción en YNF con pozos múltiples e involucrando geometría fractal y presencia de vóculos.

De esta forma, también se identifican algunos de los retos referentes a la formulación y solución matemática relacionada con la caracterización de YNF y YNFV. Asimismo, se detallan los avances recientes en cuanto a su modelación continua, considerando redes de fracturas con geometría fractal y vóculos, demostrando las ventajas de las propuestas para modelar comportamientos anómalos que no pueden describirse mediante el modelo de doble porosidad tradicional.

SE04-10

**DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS DE DESCARGA CON FINES DE BIORREMIEDIACION EN SISTEMAS ACUÁTICOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO**

Arellano Guerrero Fernando Nicolas  
 Universidad Nacional Autónoma de México  
 fnag1984@hotmail.com

En este trabajo se considera un problema variacional con el propósito de determinar el sitio óptimo de descarga y la razón de descarga óptima de un nutriente que será liberado dentro de un sistema acuático contaminado con petróleo. El objetivo es minimizar el total de la masa del nutriente descargado dentro del sistema, con la restricción de alcanzar ciertos valores críticos de la concentración del nutriente, que sean suficientes para eliminar los residuos de petróleo en determinadas áreas afectadas a través de biorremediación. Por lo tanto, los valores críticos de estas concentraciones promedio son usados como restricciones del problema variacional. Además, se considera un problema de valor inicial 3D para la ecuación de advección-difusión, junto con su problema adjunto, para modelar, estimar y controlar la dispersión del nutriente en una región limitada. Siendo las soluciones del modelo de advección-difusión y su adjunto la base para realizar el presente estudio. También, se muestra que el problema de advección-difusión es un problema bien planteado, y que

sus soluciones satisfacen la ecuación de balance de masa. En cada zona contaminada, la concentración promedio se calcula por medio de una fórmula integral en la cual la solución del modelo adjunto es el núcleo. La expresión analítica para determinar la razón óptima de descarga del nutriente esta dada como una combinación lineal de las soluciones del problema adjunto, y para la posición óptima, es posible obtener una función no-lineal cuyo valor mínimo corresponde al sitio de descarga óptimo. La aplicación de este nuevo método se muestra con varios ejemplos numéricos, donde se aplica la metodología anterior con el fin de biorremediar tres zonas contaminadas en un canal.

SE04-11

**SOLUCIÓN NUMÉRICA DE FLUJO BIFÁSICO INCOMPRESIBLE UTILIZANDO EL MÉTODO DE LÍNEAS DE CORRIENTE**

Martínez Carrada Roberto Carlos y De la Cruz Salas Luis Miguel  
 Instituto de Geofísica, UNAM  
 rmartinez.igf@gmail.com

En este trabajo se estudia un modelo de flujo bifásico incompresible en medios porosos en tres dimensiones. El modelo matemático se obtiene a partir de la formulación axiomática. Este modelo consiste de dos ecuaciones diferenciales parciales, no lineales y acopladas. En el método utilizado en este trabajo, se requiere construir líneas de corriente en el dominio de estudio, las cuales son tangentes en cada punto al campo de velocidad total. Esta velocidad, se calcula usando la presión y la saturación de las fases agua y aceite. La premisa en la Simulación con Líneas de Corriente (SLS por sus siglas en inglés) es aproximar los cálculos tridimensionales del flujo y transporte de las diferentes fases, mediante la solución de ecuaciones de transporte unidimensionales a lo largo de las líneas de corriente. La solución en una dimensión hace que este enfoque sea extremadamente rápido y efectivo para modelar flujos en yacimientos en donde existen muchas heterogeneidades. La geometría y la densidad de las líneas de corriente reflejarán el impacto geológico sobre los caminos preferenciales del flujo, introduciendo una mayor densidad de líneas en regiones de alta porosidad y permeabilidad.

En este trabajo, la discretización del sistema de ecuaciones se llevó a cabo mediante el Método de Volumen Finito (MVF). El algoritmo de solución de dichas ecuaciones se basa en el método IMPES. Se presentan resultados para un problema en un dominio regular inicialmente saturado de aceite, en donde se tiene un pozo inyector por donde se introduce agua para desplazar al aceite hacia un pozo extractor.

SE04-12

**MODELADO BIFÁSICO TRIDIMENSIONAL DE FLUIDOS EN MEDIOS POROSOS EMPLEANDO EL MÉTODO DE VOLUMEN FINITO**

Stella Ramírez Laura Minerva<sup>1</sup>, Lezama Campos José Luis<sup>2</sup> y Martínez Carrada Roberto Carlos<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Instituto de Geofísica, UNAM  
<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, UNAM  
 mini@ciencias.unam.mx

En este trabajo se estudia un modelo de flujo bifásico en medios porosos en tres dimensiones. El modelo matemático se obtiene mediante la aplicación de la formulación axiomática descrita en [1]. Este modelo consiste de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, no lineales y acopladas, las cuales se resuelven utilizando el algoritmo IMPES, véase [2]. La presión y la saturación de las fases agua y aceite ayudan a calcular el campo de velocidades total en el dominio de interés. Los campos de los volúmenes de interés, tales, no lineales y acopladas, las cuales se resuelven utilizando el algoritmo IMPES, y la discretización del sistema de ecuaciones se llevó a cabo mediante el Método de Volumen Finito (MVF), que se deriva a partir de la forma conservativa de las ecuaciones de balance. El sistema discreto resultante, cumple con el principio de conservación de las propiedades extensivas del modelo para cada uno de los volúmenes de control. La relación existente entre el algoritmo numérico y el principio de conservación es una de las mayores ventajas del MVF. A fin de optimizar el código desarrollado, se utilizó la programación paralela para arquitecturas de memoria compartida. Se realizó un análisis de rendimiento de la versión serial del programa para obtener información sobre los ciclos que toman más tiempo durante el cálculo. Estos ciclos se paralelizaron utilizando la biblioteca OpenMP [3]. Se presentan un análisis de la aceleración obtenida para diferentes arquitecturas de cómputo.

REFERENCIAS

- [1]Herrera, I., Pinder G., "Mathematical Models in Science and Engineering", John Wiley & Sons, (2011).
- [2]Chen, Z., Huan, G., Ma, Y., "Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media", SIAM, Philadelphia, (2006)
- [3]www.openmp.org/

SE04-13

**DDM APLICADO A FLUJO Y TRANSPORTE SUBTERRÁNEOS**

Hernández García Guillermo de Jesús  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
 ghdez@geofisica.unam.mx

La computación paralela es uno de los métodos más eficaces para aumentar la velocidad de cómputo. En la base de este método, en este trabajo diversas técnicas matemáticas y numéricas fueron desarrolladas para aplicar métodos de dominio de descomposición, DDM. Con base en la aplicación de este método, y los métodos de elementos finitos, para el flujo y transporte en medios porosos, fue posible obtener la paralelización eficiente de las ecuaciones que rigen en los reservorios con advección dominante. El método de descomposición de dominio ha sido investigado recientemente por varios autores para problemas elípticos y parabólicos bidimensionales y tridimensionales. Este método es atractivo porque permite el procesamiento paralelo de mallas finas para acercarse al dominio, en especial, en los problemas de transporte.

En este trabajo se considera un método iterativo sencillo de sub-estructuración que se basa en una partición en la que no se traslapan los sub-dominios. En el dominio global una frontera interna entre los dominios locales está definida. Varios métodos matemáticos y numéricos fueron desarrollados para aplicar el DDM libre de multiplicadores. Este enfoque es denominado espacio vectorial derivado (DVS) por Herrera y colaboradores. Es un espacio lineal de dimensión finita, que es una realización de un producto-espacio. Constituye un espacio de Hilbert con respecto a un producto interior que se define de forma independiente de las ecuaciones diferenciales parciales a tratar. El código desarrollado aborda el caso de flujo y transporte en medios porosos. Este enfoque produce expresiones matriciales simples y unificadas, en términos de una matriz generalizada de complemento de Schur. Aplicando este método al flujo y transporte en medios porosos, es posible obtener la paralelización eficiente de las ecuaciones que rigen en los reservorios con advección dominante.

SE04-14

**FLUJO EN MEDIOS POROSOS FRACTURADOS, UTILIZANDO DESCOMPOSICIÓN DE DOMINIO**

Vera Guzmán Norberto  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
 nrbrtr@gmail.com

En este trabajo se presenta una forma de abordar el problema de flujo en medios porosos fracturados utilizando descomposición de dominio por medio de dos modelos mixtos acoplados, uno en 3D y otro en 2D.

Para hacer esto, consideramos el dominio original en 3D y su mado correspondiente. Con base en este mado, replanteamos el problema original como un conjunto de subproblemas utilizando descomposición de dominio. En el proceso de descomposición de dominio se definen fronteras internas de cada subdominio y también, interfaces entre cada par de ellos, dando lugar a una superficie poliédrica en 2D.

En cada una de estas interfaces se plantea un modelo mixto de flujo en 2D, acoplado con dos problemas mixtos de flujo en 3D (problemas en los bloques) y también, acoplados con los problemas mixtos vecinos en 2D (cuando los haya).

El resultado final es: un conjunto de problemas mixtos planteados en 3D para los bloques o subdominios, y otro conjunto de problemas mixtos en 2D planteados para las interfaces entre cada par de bloques y con sus respectivos vecinos en 2D, todos ellos acoplados y comunicados por condiciones de transmisión de presión y flujo de masa.

Los dos conjuntos de problemas se resuelven utilizando Elemento Finito Mixto. Se presentan resultados preliminares.

SE04-15

**DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA CONSIDERANDO LA PROFUNDIDAD DE MUESTREO EN UN SISTEMA GEOLÓGICO ESTRATIFICADO**

Simuta Champo Roel<sup>1</sup> y Herrera Zamarrón Graciela<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, UNAM

<sup>2</sup>Instituto de Geofísica, UNAM

simucharo@yahoo.com

La concentración de un contaminante dentro del agua subterránea puede variar en la vertical, por lo que, para obtener una buena estimación de la concentración de un contaminante, puede ser necesario muestrear a diferentes profundidades. Esto puede ser costoso, debido a los costos asociados con la construcción del pozo y a los de los análisis químicos que tendrían que realizarse para cada ronda de muestreo. Por lo anterior, en este trabajo se presenta la extensión del método

de Herrera (1998) para considerar mediciones en la vertical en el diseño óptimo de una red de muestreo de la calidad del agua subterránea. La metodología combina simulación estocástica de flujo y transporte del agua subterránea, un ensamble suavizado (ES) y un método de optimización secuencial. Se aplicó la metodología en una región hipotética que en la vertical se divide en tres capas geológicas, dos capas de arena separadas por un acuitado de arcilla, que presenta una ventana de arena. Sobre el lado izquierdo de la región se tiene una fuente de un contaminante conservativo que ha estado activa durante 26 años. Se tiene disponible un modelo de flujo y transporte en estado transitorio de la evolución de la calidad del agua en el sitio. Cada capa de arena se dividió en dos capas numéricas. El objetivo fue determinar un programa de muestreo del contaminante para estimar su concentración en los dos acuíferos y en el acuitado para un periodo de dos años de predicción a un costo mínimo. Para ilustrar la calidad de la estimación de la pluma en 3D que se obtendría usando la metodología que aquí se presenta, se seleccionó una pluma al azar obtenida con simulación Monte Carlo y se supuso a ésta como una pluma de contaminante real. Luego, usando todos los datos que se obtendrían de la red de muestreo propuesta, se estimaron los valores de las concentraciones de contaminantes de la pluma usando el ES. Se calcularon los errores de la estimación para una submalla de la malla numérica en las cinco capas para 48 tiempos de estimación. Los resultados indican que las estimaciones que se tienen usando el ES son muy buenas, ya que los errores son muy pequeños.

SE04-16

**ENSAMBLE SUAVIZADO IMPLEMENTADO EN PARALELO CON APLICACIONES A PROBLEMAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

Leyva Suárez Esther, Herrera Zamarrón Graciela  
 del Socorro y De la Cruz Salas Luis Miguel  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
 estherley@yahoo.com

La asimilación de datos es un proceso que une modelos de predicción y mediciones usando los beneficios de ambas fuentes de información. Un método secuencial de asimilación de datos, se llama filtro de Kalman Ensamblado (EnKF por sus siglas en inglés), y fue diseñado para resolver dos de los mayores problemas relacionados con el uso del filtro de Kalman extendido (EKF por sus siglas en inglés) con dinámica no-lineal en estados de espacio grandes, es decir, el uso de un esquema cerrado de aproximación y los enormes requerimientos computacionales asociados con el almacenamiento y la posterior integración de la matriz de covarianza del error. El EnKF ha ganado popularidad debido a su simple formulación conceptual y a su relativa facilidad de implementación. Éste ha resultado útil en diversas aplicaciones de la meteorología, oceanografía y más recientemente en ingeniería del petróleo e hidrogeología.

El método de Ensamble Suavizado es un método similar al EnKF que fue propuesto por Van Leeuwen y Evensen (1996). La diferencia entre el EnKF y el ES es, que el ES proyecta información y hace estimaciones hacia atrás en el tiempo. Herrera (1998) propuso de forma independiente de Van Leeuwen y Evensen una versión del ES al que llamaremos Ensamble Suavizado de Herrera (ESH), antes llamado Filtro de Kalman Ensamblado Espacio-Temporal o Filtro de Kalman Estático, para la optimización espacio-temporal de redes de monitoreo del agua subterránea. En años recientes, este método se ha utilizado para la asimilación de datos y la estimación de parámetros en modelos de flujo y transporte del agua subterránea. Este método utiliza la simulación Monte Carlo, que consiste en generar realizaciones repetidas de la variable aleatoria considerada a través de un modelo, sin embargo, con frecuencia se requieren un gran número de corridas de los modelos para que los momentos converjan, por lo que una computadora serial puede requerir muchas horas de uso continuo, dependiendo del problema que se trate y la capacidad de la computadora. Por este motivo se requiere paralelizar el proceso para que se lleve a cabo en un tiempo razonable.

En este trabajo se presentan los resultados de la paralelización de los algoritmos requeridos para el ESH. Dichos algoritmos están programados en Fortran 90 en un software llamado GWQMonitor, desarrollado originalmente por Herrera [1998] y que ha seguido modificando con varios colaboradores. Este software se modificó para ejecutarse en paralelo utilizando dos estrategias: desarrollo de scripts y mediante la incorporación de directivas de OpenMP. Ambas se aplicaron al estudio de un acuífero simplificado en un dominio rectangular de una sola capa. Los resultados de la paralelización muestran diferentes aceleraciones en el cálculo de la matriz de covarianza, los cuales se analizan detalladamente en esta presentación.

SE04-17

**SSAP (SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM) REL. 4.1.0: UNA HERRAMIENTA SOFTWARE FREWARE COMPLETO PARA LA VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DETALDES EN SUELOS Y MACIZOS ROCOSOS**

Borselli Lorenzo  
*Instituto de Geología, UASLP*  
 lborselli@gmail.com

SSAP2010 es una herramienta software freeware para la verificación de la estabilidad de los taludes naturales y artificiales con o sin elementos de refuerzo.

SSAP es una herramienta avanzada que proporciona a los usuarios un conjunto de instrumentos originales para hacer una verificación de estabilidad usando solamente métodos de cálculo rigurosos basados en el método de equilibrio límite (LEM) y novedosos motores de generación y búsqueda de las superficies mas inestables y con menor factor de estabilidad (FS). Una interfaz gráfica Wn7 se completa con un conjunto de herramientas para el montaje del modelo de taludes y para presentar gráficos y reportes de análisis de datos.

En la versión 4.0 en adelante del programa SSAP se utiliza el algoritmo propuesto por Zhu (2005), para el cálculo del factor de estabilidad FS desarrollado por medio del método de cálculo Morgenstern y Price (1965). En el SSAP2010 el autor del software ha desarrollado durante su investigación una generalización adicional del método que permite utilizar el algoritmo de Zhu (2005) con diferentes métodos de cálculos rigurosos utilizados más ampliamente en las pruebas de estabilidad, entre ellos: Janbu 1973, Sarma I 1973, Sarma II 1979, Spencer 1967, Morgestren y Price 1965, Correia 1988.

Los motores de búsqueda de las superficies con menor factor de estabilidad (FS) está basado en una generación estocástica de superficies (métodos Montecarlo) y por medio de un sistema experto híbrido (Montecarlo + expert system) llamado "SNIFF RANDOM Search" que permite generar superficies de prueba que maximizan el pasaje en los niveles o estratos gemecánicamente mas débiles en la masa de un talud. El método Sniff Search, versión 2.0 (Borselli, 2012) es una contribución original del autor del software. Elementos de refuerzo y estabilización de taludes pueden ser integrados en los modelo de taludes y también el efecto de acuíferos colgados y/o en presión.

El software SSAP ha sido empleado en Italia desde el año 1995, en actividades profesionales y también en instituciones públicas para el análisis de estructuras y taludes. En México has sido usado para diferentes aplicaciones: Sierra Norte de Puebla (Puebla), Borselli et al. (2003), Volcán de Fuego Colima (Borselli et al., 2011, Borselli y Sarocchi, 2012)

El software se encuentra disponible de manera totalmente libre para estudiantes, profesionales e investigadores en el sitio: WWW.SSAP.EU.

SE04-18

**CÓMPUTO DE ALTO RENDIMIENTO INVESTIGANDO LA ISLA DE CALOR MEDIANTE MODELOS GEOESTADÍSTICOS**

Brito Muñoz Elizabeth<sup>1</sup>, Sánchez Gómez Rubén<sup>1</sup> y Sánchez Díaz Silvia<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, CUCEI  
<sup>2</sup>Centro Universitario de los Valles, CUVValles  
 britelli@gmail.com

La transformación antropogénica del medio ambiente en zonas urbanas logra su máxima expresión en ciudades grandes, observándose por elementos como calles, banquetas y edificios, entre otros. Este cambio de uso de suelos afecta de modo especial las condiciones climáticas, sobre todo por variaciones locales en los flujos energéticos (atmósfera - superficie), que experimenta la naturaleza por este efecto poblacional, que se expresa con una diferencia de hasta 6Å°C de temperatura entre la periferia y el centro de una ciudad. Este fenómeno se conoce como Isla de Calor, su estimación implica cálculos intensos de registros en espacio y tiempo, lo que demanda el uso de cómputo de alto rendimiento (HPC por sus siglas en Inglés) para generar una buena aproximación.

En este trabajo se presenta un caso de aplicación de HPC mostrando en los resultados de interpolación espacial, implementado en paralelo y aprovechando la funcionalidad de los paquetes multicore y GridR del proyecto R para cómputo estadístico. Se presentan además resultados obtenidos investigando este fenómeno en la Zona Metropolitana del Valle de México y la Zona Metropolitana de Guadalajara utilizando las bases de datos generadas por los sistemas automáticos de recolección de datos de las redes automáticas de monitoreo atmosférico instaladas en la Zona Metropolitana del Valle de México y en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Los resultados muestran evidencia clara de la presencia de la isla de calor en ambas zonas.

SE04-19

**SIMULADOR DE VUELO NO TRIPULADO PARA EL RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES EN ZONAS DE RIESGO**

Velasco Herrera Graciela<sup>1</sup>, Pérez Moreno César Angel Giovanni<sup>2</sup>, Kemper Valverde Nicolas<sup>1</sup>, Taque Vázquez Julio Cesar<sup>2</sup>, Ochoa Toledo Luis<sup>1</sup> y Sosa Flores Oscar<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM  
<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, UNAM  
 graciela.velasco@ccadet.unam.mx

En este trabajo se presenta un sistema de visión computacional para el reconocimiento de texturas de imágenes de zonas de riesgo en particular volcánicas, tomando una base de datos de imágenes espaciales, el sistema de visión computacional nos permite el reconocimiento y clasificación de los diferentes tipos de áreas que colindan con zonas conurbadas, forestales y de agricultura.

La base de datos fue obtenida de un simulador de vuelo no tripulado, el sistema esta integrado por una cámara digital de alta resolución; este sistema ayuda a identificar el comportamiento de volcanes activos y las fracturas de suelo que estos provocan.

Para diseñar un primer sistema de reconocimiento, se seleccionaron cuatro tipos de suelo para ser reconocidos: zonas urbanas, zonas de bosques, zonas volcánicas y áreas agrícolas. Para el proceso de entrenamiento del clasificador neuronal, así como para comprobar el sistema de reconocimiento, se han utilizado imágenes aeroespaciales de alta resolución.