 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA

TÍTULO: Un Modelo Ejecutable para la Simulación Multi-física de Procesos de Recobro Mejorado en Yacimientos de Petróleo Basado en Esquemas Preconceptuales.

DIRECTOR: Ph.D. Juan Manuel Mejía Cárdenas

CODIRECTOR: Ph.D. Carlos Mario Zapata Jaramillo

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería, Ingeniería de Sistemas

PERFIL: Investigación

AUTOR

NOMBRE Steven Velásquez Chancí

CÉDULA: 1017225565

E-MAIL svelasquezc@unal.edu.co

TELÉFONO: 300490775

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA


La simulación de recobro mejorado en yacimientos de petróleo es un proceso en el cual se resuelve un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales para un dominio dado. La simulación involucra la elección de modelos, métodos de discretización, tanto en el tiempo como en el espacio; métodos de solución de sistemas no lineales, al igual que métodos de solución de sistemas lineales y preconditionamiento de estos. Estas elecciones tienen un impacto en las capacidades de solución de ecuaciones que surgen de los diferentes problemas físicos, además del costo computacional implicado.

Los simuladores desarrollados actualmente tienen un tiempo útil esperado de alrededor de 10 años (DeBaun, Byer, Childs, & Chen, 2005), varios de los cuales se centran en el estudio de limitados problemas físicos. Esto puede ser debido a carencias en diseño o a la optimización de las herramientas para un problema específico. Con el desarrollo de nuevas técnicas de recobro mejorado se hace necesario el modelamiento de comportamientos complejos dentro del yacimiento, por lo cual estos simuladores deben ser flexibles para acoplar nuevos modelos.

Por tanto, al ser el diseño de un simulador un derivado de la representación o modelo del dominio de la simulación, se requiere un modelo ejecutable para la simulación multi-física de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo que permita la generalidad suficiente para poder derivar diseños flexibles.

2. JUSTIFICACIÓN

Una caracterización del dominio de la simulación de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo, en un lenguaje controlado cercano al lenguaje natural, permite la creación de arquitecturas robustas y flexibles con la capacidad de acoplar nuevos modelos matemáticos y simular fenómenos

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

físicos complejos, por lo que una representación intermedia de este dominio facilita el diseño de las arquitecturas para las herramientas de simulación en lenguajes de modelado formales de manera correcta con la sintaxis y consistente con la caracterización.

En esta tesis de maestría proponemos el desarrollo de un modelo ejecutable para la simulación multi-física de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo usando esquemas preconceptuales para la representación de los fenómenos físicos relevantes a los procesos de recobro mejorado y los métodos de solución más adecuados para la solución de las ecuaciones resultantes de la conceptualización y matematización de estos fenómenos.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo ejecutable para la simulación multi-física de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo basado en esquemas preconceptuales.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los fenómenos de transporte, transferencia y de superficie más relevantes durante los procesos de recobro mejorado para yacimientos de petróleo.
- Conceptualizar los elementos del sistema y las interacciones físicas y químicas que se presentan en los procesos de recobro mejorado para yacimientos de petróleo.
- Diseñar una estrategia de solución numérica multipropósito de los sistemas de ecuaciones algebraicas y diferenciales que describen los mecanismos físicos y químicos que gobiernan los procesos de recobro mejorado.
- Construir una simulación basada en esquemas preconceptuales ejecutables.
- Validar los esquemas preconceptuales ejecutables con la literatura.


4. MARCO TEÓRICO

Simulación de yacimientos de petróleos

La simulación de yacimientos de petróleo es un proceso que requiere conocimiento en áreas como petrofísica, geoquímica, matemáticas y computación (Qiao, Khorsandi, & Johns, 2017). Este proceso requiere la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales dados por ecuaciones de conservación de masa, conservación de energía y conservación de momento, las cuales son llamadas las ecuaciones gobernantes del modelo. Adicionalmente, se pueden acoplar ecuaciones constitutivas adicionales representando los distintos fenómenos que se presentan ante la existencia de nuevos componentes relacionándose y generando dinámicas complejas en el yacimiento.

Modelo Black Oil:

El modelo *black oil* es un modelo que consta de 3 ecuaciones gobernantes correspondientes al transporte de 3 componentes (agua, gas, aceite) en 3 fases (oleica, volátil, acuosa). En este sólo se considera la presencia de gas en la fase oleica y se ve representado en el coeficiente de partición “Rs”, y que indica la cantidad de gas condensado. El flujo en cada una de las fases se representa mediante la ecuación de Darcy. Las variables de estado son la presión del aceite, la saturación de gas, y la

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

saturación de agua. Y todas las demás propiedades son calculadas en términos de estas 3 variables de estado. Este modelo puede ser extendido para considerar aceite en la fase volátil, que se representa con el coeficiente de partición “Rv” (Turgay, Jamal, & Gregory, 2001).

Modelo Composicional

El modelo composicional es la representación más general de un yacimiento, en este se tiene una cantidad arbitraria de fases y de componentes, desagregando el componente aceite en diferentes componentes hidrocarburos moviéndose en la fase oleica. En este modelo, las variables de estado son las concentraciones molares de cada uno de los componentes (Coats, Thomas, & Pierson, n.d.). Adicionalmente, las propiedades dependientes de la presión de las fases son calculadas por medio de una ecuación de estado (EoS).

Discretización

Las ecuaciones de los modelos *black oil* y composicional son ecuaciones diferenciales parciales modeladas para un medio continuo, la solución numérica de estas soluciones se hace sobre un dominio discreto, para ello es necesario expresar cada ecuación en términos de variables y propiedades que se evalúan sobre elementos o volúmenes de control, de manera que se obtenga la solución en cada uno de los elementos de control. El conjunto de todos elementos de control es la malla que representa el dominio. Los métodos más utilizados para discretizar las ecuaciones de transporte en medios porosos son los volúmenes finitos y las diferencias finitas. Sin embargo, hay trabajos en los que las ecuaciones se discretizan usando métodos de elementos finitos (Yang, Sun, Li, & Yang, 2018).


Métodos de Solución no Lineales

Una vez discretizadas las ecuaciones se obtiene una ecuación diferencial algebraica cuya dependencia entre variables puede ser no-lineal, como por ejemplo la permeabilidad de las fases depende la presión de estas, y las presiones cada una de las fases dependen a su vez de la presión del aceite. Estas no-linealidades se resuelven aplicando diversos métodos de Newton que consisten en construir una matriz jacobiana en la que cada elemento corresponde a la derivada del residual de una de las ecuaciones gobernantes del modelo respecto a una de las variables de estado (Li & Zhang, 2014; Yang et al., 2018).

Métodos de Solución Lineales

Del método de solución no lineal resulta un sistema lineal de ecuaciones, para la solución de estos sistemas de ecuaciones se han desarrollado numerosos métodos de solución que se dividen en dos tipos: estacionarios y no estacionarios o iterativos. Entre los métodos estacionarios se encuentran Gauss-Seidel, SOR, Gauss-Jordan, entre otros. Los métodos iterativos son todos los métodos derivados del Gradiente Conjugado, estos métodos iteran sobre un supuesto inicial convergiendo a una solución aproximada, usando una tolerancia ya sea absoluta o relativa como criterio de parada (Zaza, Awotunde, Fairag, & Al-Mouhamed, 2016). Los ejemplos de estos métodos son los métodos basados en subespacios de Krylov, como GMRES, MINRES, BiCGStab, entre otros.

Precondicionamiento

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

Los sistemas de ecuaciones lineales resultantes son mal condicionados, por tanto, el preconditionamiento se hace relevante a la hora de resolver el sistema, este proceso consiste en multiplicar todo el sistema por una matriz cuyo propósito es disminuir el número de condición de la matriz original del sistema. El sistema preconditionado, será más sencillo de resolver en términos computacionales y la solución obtenida tendrá más validez (menor margen de error). El preconditionador comúnmente utilizado en simulación de yacimientos de petróleo es ILU (*Incomplete LU Factorization*), pero se han desarrollado otros preconditionadores que abordan el sistema lineal desde la física del problema como lo son los preconditionadores de tipo CPR (*Constrained Pressure Residual*) (Wang, Liu, Luo, & Chen, 2018).

Esquemas Preconceptuales

Los Esquemas Preconceptuales son un tipo de grafo que permite representar un dominio a partir de lenguaje natural, usando una notación y un lenguaje controlado. Este esquema considera tanto la estructura como las interacciones que existen entre elementos del dominio, que se modelan a partir de conceptos y relaciones tanto estructurales como dinámicas. La representación obtenida a partir de un esquema preconceptual es una representación intermedia y tiene la ventaja de traducirse de manera consistente y correcta a lenguajes de modelado como UML (Zapata Jaramillo, 2007).


4.1. ANTECEDENTES

En el dominio de la simulación de yacimientos varias herramientas generales han sido desarrolladas como *frameworks* para estudiar diferentes fenómenos acoplando diferentes técnicas de solución. Por ejemplo, (Weller, Tabor, Jasak, & Fureby, 1998) desarrollaron una librería en C++ con la capacidad de simular modelos matemáticos y físicos complejos usando un lenguaje de alto nivel. Los autores utilizaron técnicas de programación orientada a objetos para crear un metalenguaje puramente matemático. La librería también cuenta con diferenciación automática (AD) de las ecuaciones generadas en la notación propuesta en esta.

(Parashar, Wheeler, Pope, Wang, & Wang, 1997) crearon un simulador de yacimiento con ecuaciones de estado para resolver problemas con múltiples fases y múltiples componentes; con la capacidad de recibir funciones arbitrarias para la densidad y la viscosidad de las fases. La arquitectura definida está compuesta por capas, la primera capa corresponde a una implementación de Arreglos Dinámicos Jerárquicos Distribuidos o (HDDA – *Hierarchical Distributed Dynamic Arrays*), sobre esta implementación están desarrolladas las llamadas abstracciones de programación, como lo son la malla adaptativa, los árboles, etc. Luego los componentes y los módulos: los solucionadores, interpoladores y agrupadores pertenecen a esta parte de la arquitectura. Finalmente, la visualización, entrada y salida, y la API.

(Cao, 2002) desarrollo el simulador de yacimientos de propósito general o (GPRS *General-Purpose Reservoir Simulator*), el cual tiene una formulación general para la simulación composicional y múltiples interfaces a librerías para: implementación de mallas, solucionadores lineales, y demás utilidades. La arquitectura de GPRS se describe en el apéndice A, donde son explicadas las clases y su jerarquía. En esta jerarquía, la clase “Campo” es el contenedor de diferentes clases “dominio” que relacionan diferentes yacimientos con distintos pozos, cada uno con sus respectivas propiedades.

(Flemisch et al., 2011) desarrollaron un simulador de yacimientos sobre DUNE (*Distributed and Unified Numerics Environment*), el simulador tiene la capacidad de simular flujo en dos fases con un modelo

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

de múltiples medios continuos (MINC), MINC consiste en la superposición de dominios usando un modelo de doble porosidad y doble permeabilidad que permite simular fracturas hidráulicas y naturales. Las variables de los modelos pueden ser resueltas de manera completamente implícita y acoplada o de manera secuencial. El simulador fue desarrollado en 5 módulos principales: la aplicación, el control de la simulación, el esquema numérico, el sistema de material, y los conceptos del modelo para el flujo y transporte.


(Li & Zhang, 2014) desarrollaron una librería para diferenciación automática usando árboles sintácticos para expresiones matemáticas. A partir de esta librería los autores pueden calcular automáticamente gradientes de flujo. Los cuales son especialmente útiles para la construcción de la matriz Jacobiana del método de Newton, puesto que los gradientes de primer orden del flujo son requeridos para el cálculo de la matriz.

Para estudiar interacciones y comportamiento complejo dentro del yacimiento otros modelos han sido incluidos, como en (Wang, Liu, Luo, & Chen, 2017) Ellos usan MINC acoplado tanto al modelo *black oil* como al modelo composicional. Además, su simulador lee mallas estructuradas y no estructuradas, usando el formato CORNERPOINT. Un modelo geomecánico fue incluido, este es discretizado usando elementos finitos. Además, tienen cuatro tipos de ecuaciones para modelar el flujo en los diferentes dominios, estos son: difusión de Knudsen, flujo de transición, flujo de deslizamiento, y flujo continuo. El uso de uno u otro modelo para el flujo depende del número de Knudsen, el cuál relaciona los medios entre los cuales se mueve el fluido. Los autores mencionan que más de la mitad del tiempo de simulación es utilizado en la solución de sistemas lineales, por lo que implementaron un preconditionador de residual de presión restringido (CPR) para acelerar el proceso de solución de cada sistema lineal resultante de cada iteración del método de Newton inexacto. Este preconditionador consiste en dividir la matriz en bloques separados por las variables físicas que se resuelven, es decir, presión y saturación. La sub-matriz de presión es solucionada usando un preconditionador algebraico multi-malla y la saturación usando el preconditionador FASP (*Fast Auxiliary Space Preconditioner*).

(Wang et al., 2018) desarrollaron un modelo *black oil* con chequeo de balance de masa y paso de tiempo adaptativo. Los autores usaron un enfoque completamente implícito junto con el método de diferencias finitas para la discretización espacial de las ecuaciones. Adicionalmente, los autores compararon los preconditionadores RAS-ILU (*Restricted Additive Schwarz – Incomplete LU Factorization*) con varios preconditionadores del tipo CPR. Una selección adaptativa del método de preconditionamiento fue implementada con miras a la robustez de la solución del simulador, el cuál escogía entre 2 de los preconditionadores mencionados arriba basado en un valor de tolerancia relativa obtenido de la última iteración del solver de Krylov utilizado. Los autores explican que el preconditionador RAS-ILU requiere menos cálculos que cualquiera de los preconditionadores de tipo CPR implementados, pero que este último aportaba más robustez a la solución.

Un simulador multi-escala para fracturas discretas fue desarrollado por (FANG et al., 2017), este simulador usa el modelo MINC, con una superposición de los dominios de fractura y matriz. Para el cálculo del flujo entre estos dos dominios se implementó un modelo “*half transmissivity*” que usa un “*star-delta*” en el cual se usa el flujo Darcy para comportamiento a gran escala y un modelo de flujo no lineal para conectar el flujo entre la matriz y las fracturas. Las fracturas fueron modeladas como mallas de una dimensión embebidas dentro de una malla no estructurada para la matriz.

(Wang, Liu, Luo, & Chen, 2016) desarrollaron un simulador multi-fase para múltiples medios continuos, con la capacidad de modelar fracturas naturales e hidráulicas, tanto el modelo *black oil* como el


 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

composicional fueron implementados. Para la solución del sistema de ecuaciones algebraicas no lineal se usó el método de Newton Inexacto, cambian de preconditionador dependiendo de la tolerancia de la última iteración del GMRES (*Generalized Minimum Residual*). El simulador fue implementado sobre la plataforma PRSI para computaciones en paralelo. Los resultados de los experimentos numéricos permitieron concluir que el simulador en paralelo tiene un *speed-up* de 70%

(Yang et al., 2018) desarrollaron un simulador de dos fases (aceite y agua) usando un método de discretización de elementos finitos híbrido con funciones base de segundo orden y combinado con Euler hacia atrás para la discretización del tiempo usando un esquema implícito. Una vez discretizadas las ecuaciones, el método para solucionar el sistema no lineal resultante fue Newton-Krylov, el cual consiste en ensamblar la matriz Jacobiana del método de Newton y usar una combinación de GMRES con *Additive Schwarz (AS)* como método de preconditionamiento. El simulador fue implementado sobre PETSc, una plataforma escalable para cálculos numéricos. Los autores evaluaron su simulador usando diferentes valores del parámetro de *overlap* para el preconditionador AS, obteniendo un *speed-up* del 100%.

5. METODOLOGÍA

Objetivo Específico	Actividades
Establecer los fenómenos de transporte, transferencia y de superficie más relevantes durante los procesos de recobro mejorado para yacimientos de petróleo.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Revisión Sistemática de la literatura en procesos de recobro mejorado. 2. Identificación de componentes de inyección utilizados en los procesos de recobro mejorado. 3. Agrupación de fenómenos físicos por sus mecanismos e interacciones entre componentes.
Conceptualizar los elementos del sistema y las interacciones físicas y químicas que se presentan en los procesos de recobro mejorado para yacimientos de petróleo.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agrupación de los modelos matemáticos existentes para cada fenómeno. 2. Definición de relaciones de estructura en los parámetros de los modelos y los componentes que interactúan en el fenómeno. 3. Elaboración de un esquema preconceptual con la relación estructural de los conceptos presentes
Diseñar una estrategia de solución numérica multipropósito de los sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas que describen los mecanismos físicos y químicos que gobiernan los procesos de recobro mejorado.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Agrupación y caracterización de las relaciones dinámicas que representan la solución de los sistemas de ecuaciones diferenciales que describen los fenómenos.
Construir una simulación basada en esquemas preconceptuales ejecutables.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Construcción de esquemas preconceptuales ejecutables por cada relación dinámica.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

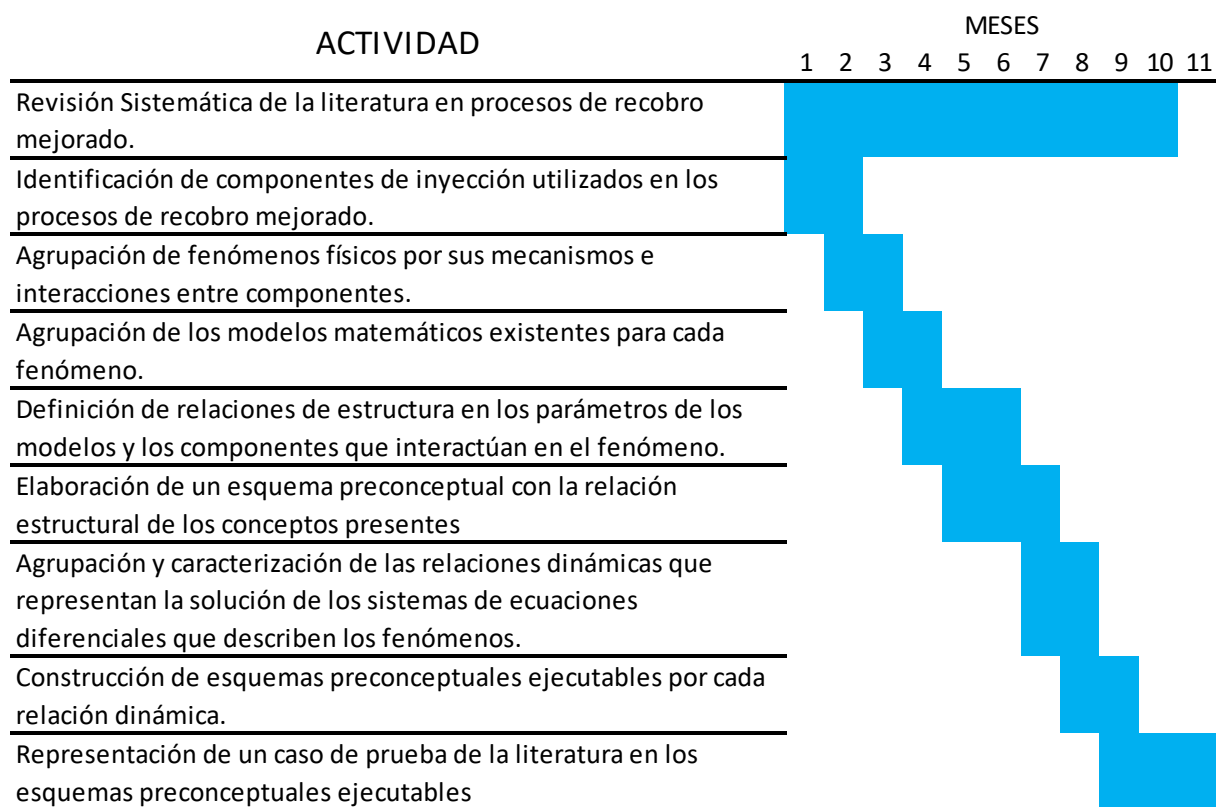
**Validar los esquemas
preconceptuales ejecutables
con la literatura.**

1. Representación de un caso de prueba de la literatura en los esquemas preconceptuales ejecutables

6. ALCANCES DEL TRABAJO


En esta tesis de maestría se desarrolla un esquema preconceptual con la representación de todo el dominio de simulación multi-física para procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo, además se desarrollan los esquemas preconceptuales ejecutables que caracterizan el comportamiento dinámico de la simulación.

7. PLAN DE TEMAS Y CRONOGRAMA



8. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- Cao, H. (2002). *Development of Techniques for General Purpose Research Simulator*. Ph. D. Thesis, Stanford University.
- Coats, K. H., Thomas, L. K., & Pierson, R. G. (n.d.). Compositional and Black Oil Reservoir Simulation. <https://doi.org/10.2118/50990-PA>
- DeBaun, D., Byer, T., Childs, P., & Chen, J. (2005). An extensible architecture for next generation scalable parallel reservoir simulation. ... *Reservoir Simulation* <https://doi.org/10.2118/93274-MS>
- FANG, W., JIANG, H., LI, J., WANG, Q., KILLOUGH, J., LI, L., ... YANG, H. (2017). A numerical simulation model for multi-scale flow in tight oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 44(3),

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	MACROPROCESO: FORMACIÓN	Código:
	FORMATO: PROPUESTA DE TRABAJO FINAL O PROYECTO DE TESIS MAESTRÍA	Versión:
		Página: 1 de 1

- 446–453. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30051-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30051-4)
- Flemisch, B., Darcis, M., Erbertseder, K., Faigle, B., Lauser, A., Mosthaf, K., ... Helmig, R. (2011). DuMux: DUNE for multi-{phase,component,scale,physics,...} flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 34(9), 1102–1112. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.03.007>
- Li, X., & Zhang, D. (2014). A backward automatic differentiation framework for reservoir simulation. *Computational Geosciences*, 18(6), 1009–1022.
- Parashar, M., Wheeler, J. A., Pope, G. A., Wang, K., & Wang, P. (1997). A new generation EOS compositional reservoir simulation: Part II. In *Framework and multiprocessing. Paper SPE 37977 presented at the 1997 SPE Reservoir Simulation Symposium, June, San Antonio, TX*.
- Qiao, C., Khorsandi, S., & Johns, R. T. (2017). A General Purpose Reservoir Simulation Framework for Multiphase Multicomponent Reactive Fluids. In *SPE Reservoir Simulation Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Turgay, E., Jamal, H. A. K., & Gregory, R. K. (2001). Basic applied reservoir simulation. *Sponsored by Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME SPE Richardson, Texas*.
- Wang, K., Liu, H., Luo, J., & Chen, Z. (2016). A multi-continuum multi-phase parallel simulator for large-scale conventional and unconventional reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.040>
- Wang, K., Liu, H., Luo, J., & Chen, Z. (2017). Development of a Parallel Simulator Utilizing Multiple Interacting Continua and Embedded Discrete Fracture Models in Fractured Unconventional Reservoirs. *SPE Europec Featured at 79th EAGE Conference and Exhibition*. Paris, France: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/185805-MS>
- Wang, K., Liu, H., Luo, J., & Chen, Z. (2018). Efficient CPR-type preconditioner and its adaptive strategies for large-scale parallel reservoir simulations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 328, 443–468. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2017.07.022>
- Weller, H. G., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998). A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*, 12(6), 620–631.
- Yang, H., Sun, S., Li, Y., & Yang, C. (2018). A scalable fully implicit framework for reservoir simulation on parallel computers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 330, 334–350. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.10.016>
- Zapata Jaramillo, C. M. (2007). *Definición de un esquema preconceptual para la obtención automática de esquemas conceptuales de UML*. Ph. D. Thesis, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Zaza, A., Awotunde, A. A., Fairag, F. A., & Al-Mouhamed, M. A. (2016). A CUDA based parallel multi-phase oil reservoir simulator. *Computer Physics Communications*, 206, 2–16. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.04.010>

Fecha de presentación:

Nota: El profesor responsable debe ingresar en el SIA la calificación del proyecto o la propuesta.