



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

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

Steven Velásquez Chancí

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión
Medellín, Colombia
2019

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

Steven Velásquez Chancí

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Ingeniería de Sistemas

Director:

Ph.D. Juan Manuel Mejía Cárdenas

Co-Director:

Ph.D. Carlos Mario Zapata Jaramillo

Línea de Investigación:

Inteligencia de Software

Grupo de Investigación:

Dinámicas de Flujo y Transporte en medios porosos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2019

(Dedicatoria o un lema)

Su uso es opcional y cada autor podrá determinar la distribución del texto en la página, se sugiere esta presentación. En ella el autor dedica su trabajo en forma especial a personas y/o entidades.

Por ejemplo:

A mis padres

o

La vida es dura, pero es más dura...
la verdura.

Agradecimientos

Agradecimientos eternos a Paola Andrea Noreña Cardona, por su constante fé, apoyo y asesoría durante el desarrollo de esta tesis.

Esta sección es opcional, en ella el autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la realización de la tesis o trabajo de investigación. Si se incluye esta sección, deben aparecer los nombres completos, los cargos y su aporte al documento.

Finalmente agradezco a la alianza formada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento del "Plan Nacional para el Potenciamiento de la Tecnología CEOR con Gas Mejorado Químicamente" bajo el acuerdo 273-2017, dentro del cual se enmarca la investigación asociada a esta tesis de maestría.

Resumen

El resumen es una presentación abreviada y precisa (la NTC 1486 de 2008 recomienda revisar la norma ISO 214 de 1976). Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Se recomienda que este resumen sea analítico, es decir, que sea completo, con información cuantitativa y cualitativa, generalmente incluyendo los siguientes aspectos: objetivos, diseño, lugar y circunstancias, pacientes (u objetivo del estudio), intervención, mediciones y principales resultados, y conclusiones. Al final del resumen se deben usar palabras claves tomadas del texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), las cuales permiten la recuperación de la información.

Palabras clave: (máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado).

A continuación se presentan algunos ejemplos de tesauros que se pueden consultar para asignar las palabras clave, según el área temática:

Artes: AAT: Art y Architecture Thesaurus.

Ciencias agropecuarias: 1) Agrovoc: Multilingual Agricultural Thesaurus - F.A.O. y 2) GEMET: General Multilingual Environmental Thesaurus.

Ciencias sociales y humanas: 1) Tesauro de la UNESCO y 2) Population Multilingual Thesaurus.

Ciencia y tecnología: 1) Astronomy Thesaurus Index. 2) Life Sciences Thesaurus, 3) Subject Vocabulary, Chemical Abstracts Service y 4) InterWATER: Tesauro de IRC - Centro Internacional de Agua Potable y Saneamiento.

Tecnologías y ciencias médicas: 1) MeSH: Medical Subject Headings (National Library of Medicine's USA) y 2) DECS: Descriptores en ciencias de la Salud (Biblioteca Regional de Medicina BIREME-OPS).

Multidisciplinarias: 1) LEMB - Listas de Encabezamientos de Materia y 2) LCSH - Library of Congress Subject Headings.

También se pueden encontrar listas de temas y palabras claves, consultando las distintas bases de datos disponibles a través del Portal del Sistema Nacional de Bibliotecas¹, en la sección Recursos bibliográficos. opción "Bases de datos".

Abstract

Es el mismo resumen pero traducido al inglés. Se debe usar una extensión máxima de 12

¹ver: www.sinab.unal.edu.co

renglones. Al final del Abstract se deben traducir las anteriores palabras claves tomadas del texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), llamadas keywords. Es posible incluir el resumen en otro idioma diferente al español o al inglés, si se considera como importante dentro del tema tratado en la investigación, por ejemplo: un trabajo dedicado a problemas lingüísticos del mandarín seguramente estaría mejor con un resumen en mandarín.

Keywords: palabras clave en inglés(máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado)

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| 2-1. Medio poroso y volumen de elemento representativo. | 4 |
| 2-2. Esquemático de un yacimiento cerrado. | 7 |
| 2-3. Esquemático de pozo multiperforado. | 9 |
| 2-4. Aproximación a la derivada de una función. | 9 |
| 2-5. Elementos del EP. | 11 |
| 2-6. Elementos para la representación de Software Científico. | 13 |
| 2-7. Condiciones Iniciales. | 14 |
| 2-8. Conceptos tipo arreglo. | 14 |
| 2-9. Ejemplo de parámetros. | 15 |
| 2-10. Ejemplo de vector independiente. | 15 |
| 2-11. Ejemplo de función, cálculo del potencial. | 15 |
| 4-1. Conceptos principales en la simulación. | 22 |
| 4-2. Definición de la malla. | 28 |
| 4-3. Caracterización de la Roca. | 29 |
| 4-4. Caracterización del fluido. | 30 |
| 4-5. Caracterización del fluido. | 30 |
| 4-6. Adición de Relaciones de equilibrio. | 31 |
| 4-7. Adición de Interacción entre fluidos. | 32 |
| 4-8. Perforación de Pozos. | 33 |
| 4-9. Representación en EP de la simulación de procesos EOR. | 34 |
| 4-10. Diagrama basado en el grafo de interacción de eventos. | 35 |
| 4-11. Representación de la aparición de la Malla. | 36 |
| 4-12. Representación del paso del tiempo. | 37 |
| 4-13. Especificación del evento Presión del fluido varía. | 38 |
| 4-14. Actualización de propiedades al término actual. | 39 |
| 4-15. Recálculo de Propiedades al término actual para la iteración. | 39 |
| 4-16. Cálculo de residual para la iteración. | 40 |
| 4-17. Cálculo y armado de la matriz del jacobiano al término actual para la iteración. | 40 |
| 4-18. Sistema lineal resultante del método de Newton-Raphson. | 41 |
| 4-19. Recálculo de Propiedades al término actual para la iteración. | 41 |

Lista de Tablas

3-1. Síntesis de la revisión de literatura. 18

1. Introducción

Oil reservoir simulation has proven an useful tool for predicting reserves and production along the years. A large quantity of studies have demonstrated the capacity of oil reservoir simulation for predicting the production of multiple reservoirs around the world .The simulation of such a problem consists of solving a coupled set of mass balance equations across a domain (reservoir, geometry - geological model). Therefore, the creation of oil reservoir simulators is in the scietific software research area (Rewrite).

Oil reservoir simulation consists of solving a set of coupled mass or moles balance equations, these equations are non-linear and need adecuate treatment in order to have a linear system that converges.

Since the natural production is no longer maintainable, techniques of enhanced oil recovery (EOR) have been developed in order to mantain or even improve the recovery factor. These techniques involve the injection of chemicals that affect the rock and fluids properties making feasible to change the oil mobility and residual saturations... The EOR processes add new equations to the system that make the problem even bigger. Many authors have addressed this problem by making general flow simulation frameworks. Those frameworks implement the general workflow of solving the coupled set of equations generated by the phenomena in the reservoir.

Some efforts have been done in the scientific software representation. Noreña et al. extend the preconceptual schema syntax defined by Zapata, 2007. for taking into account the elements needed in the scientific software context. Chaverra, 2011 includes cycles and conditional selection in the preconcpetual schema. Calle, 2017 defines design patterns in the context of scientific software using preconceptual schemas also extending its syntax.

The existing frameworks vary in implementation, even though they apply the same techniques. This is due to the fact that design decisions are delegated to the programmer, which is an expert of flow in porous media simulation. Little effort has been done in representing the domain of reservoir simulation as is, including both dynamics and structure in the same representation. The existing studies in oil reservoir simulation domain representation lack of grouping the structural design with the dynamical behaviour. Others implement directly a solution of the set of differential equations for the specific study case. The problem knowledge is not shareable. The representations existing only account for the structural or, exclusively the dynamical behavior of the tool they developed. The use of the concepts lacks generality. Even though the formal definition of the differential equations, they lack information of constitutive equations.

In this thesis we propose an event based representation of the enhanced oil recovery simulation using preconceptual schemas. In order to do that, For this purpose. we describe the black oil simulation domain in the preconceptual schema syntax, later we define a generic component with both variable kinetical behavior and the capacity to change the flow properties in each phase. The developed model couples the models used for an enhanced oil recovery process in a preconceptual schema that represents adequately the oil reservoir simulation domain, the representation is validated with the SPE Comparative solution project having accordance with the reported results.

2. Marco teórico

2.1. El medio poroso

Para entender la física detrás de la simulación de yacimientos de petróleo es necesario revisar el concepto de medio poroso. Un medio poroso puede entenderse como un dominio espacial ocupado parcialmente por un sólido y con una porción ocupada por fluidos a la que se le llama espacio vacío o poroso. Un yacimiento es un medio poroso que ocurre naturalmente, una formación geológica del subsuelo, que, a nivel microscópico, está compuesta por una red de poros que pueden estar interconectados y que almacenan fluidos (Bear, 2018).

La definición de medio poroso se extiende de la definición de un medio continuo. Un medio continuo, es aquel que no pierde sus propiedades al ser cuando se divide infinitamente, es decir, sus propiedades son continuas en todo punto. Sin embargo, esta definición depende del nivel de observación. A nivel microscópico, si se toman medidas de espacio poroso en diferentes puntos, es posible encontrar zonas vacías y otras ocupadas por la roca. Por otro lado, al incrementar el tamaño de la muestra para la medida, es posible notar que las medidas toman valores menos oscilatorios, tal como se muestra en la figura **2-1**. El mínimo tamaño de muestra al que el espacio poroso empieza a tomar un valor constante se le llama volumen de elemento representativo (REV) (Bear, 2018). El espacio poroso medido en un REV, es lo que se denota porosidad (ϕ), que corresponde a la capacidad de almacenamiento de fluidos a nivel macroscópico.

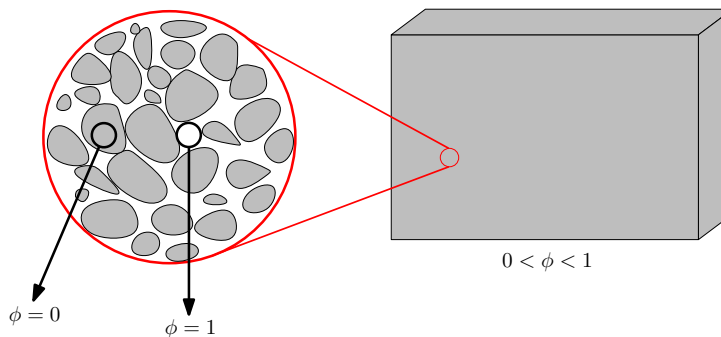


Figura 2-1.: Medio poroso y volumen de elemento representativo. Los autores.

2.2. Transporte de fluidos en medios porosos

Los fluidos que se almacenan en el yacimiento, en general, se encuentran en un estado estable, el cuál se ve afectado por la aplicación de diferentes campos actuando sobre el dominio físico (el medio poroso). Así, los fluidos pueden transportarse debido a efectos gravitacionales, cambios de presión, saturación, entre otros.

El flujo macroscópico de los fluidos se rige por la ley de conservación de momentum en medios porosos o ley de Darcy que se enuncia en la ecuación 2-1. En esta ley se establece que la velocidad Darcy (\vec{u}) de un fluido es proporcional a los gradientes de presión y gravitacionales ($\nabla\Phi$ con $\Phi = p - \rho gz$) de un fluido, e inversamente proporcional a su viscosidad (μ). Además, depende de la conductividad del medio poroso, a la cuál, se le denomina permeabilidad absoluta (\mathbb{K}).

$$\vec{u} = \frac{\mathbb{K}}{\mu} (\nabla\Phi) \quad (2-1)$$

donde $\mathbb{K}(\vec{x}, t)$ es una propiedad direccional con $\vec{x} = (x, y, z)$:

$$\mathbb{K} = \begin{pmatrix} k_{xx} & & \\ & k_{yy} & \\ & & k_{zz} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

Lo anterior, aplica para un solo fluido. En el caso de múltiples fluidos ocupando el espacio poroso se usa la ecuación 2-3. En ésta, se introduce un término de permeabilidad relativa ($kr_f(S_f)$), que depende de la proporción del volumen poroso ocupado por un fluido, el cuál se denomina saturación (S_f).

$$\vec{u}_f = \frac{\mathbb{K}kr_f}{\mu_f} \nabla\Phi_f \quad (2-3)$$

2.3. Simulación de Yacimientos de Petróleo

El dominio de la simulación de petróleo de hidrocarburos se enmarca dentro del contexto del desarrollo de software científico porque apoya procesos industriales y de investigación de nuevas tecnologías (Kelly, 2015); los cuales requieren la implementación de modelos matemáticos complejos que representan múltiples fenómenos físicos y químicos entre los fluidos.

La simulación de yacimientos de petróleo se rige por las leyes de conservación de la masa y del momentum. Estas leyes describen la acumulación, transporte, y, fuentes y sumideros de

los fluidos como un sistema de ecuaciones diferenciales parciales acopladas para un dominio físico. Solucionar estos sistemas analíticamente, cuando es viable, requiere imponer condiciones que se alejan de los problemas reales (Ertekin et al., 2001). Por lo tanto, es necesario una solución numérica o simulación. Un modelo de simulación ampliamente utilizado en la industria es el *Black Oil Model*.

2.3.1. Modelo Black Oil Extendido

El *Black Oil Model* (BOM) es un modelo de conservación de volumen a condiciones estándar. En éste, se considera la existencia de tres fluidos en el medio poroso: aceite, gas y agua. En el BOM, se asume que el aceite o petróleo, está a condiciones de barril estándar, es decir, a presión y temperatura atmosférica. Además, se supone que no existen variaciones considerables en la composición del aceite y del gas (Abou-Kassem et al., 2006; Chen, 2007; Ertekin et al., 2001). En éste modelo se considera que puede existir una transferencia de masa en equilibrio desde aceite al gas, lo que se denomina “Gas disuelto”. Adicionalmente, en el modelo *Black Oil* extendido, se considera una transferencia de masa desde el gas al aceite, lo que se denomina “aceite volatilizado”. Las ecuaciones de conservación de volumen del BOM se presentan en 2-4, 2-5, 2-6.

$$\text{aceite: } \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_o}{B_o} + \frac{R_v S_g}{B_g} \right) \right] - \nabla \cdot \left(\frac{1}{B_o} \vec{u}_o + \frac{R_v}{B_g} \vec{u}_g \right) + \tilde{q}_o = 0 \quad (2-4)$$

$$\text{gas: } \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_s S_o}{B_o} \right) \right] - \nabla \cdot \left(\frac{1}{B_g} \vec{u}_g + \frac{R_s}{B_o} \vec{u}_o \right) + \tilde{q}_g = 0 \quad (2-5)$$

$$\text{agua: } \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_w}{B_w} \right) \right] - \nabla \cdot \left(\frac{1}{B_w} \vec{u}_w \right) + \tilde{q}_w = 0 \quad (2-6)$$

donde \vec{u}_f corresponde a la velocidad Darcy, y, \tilde{q}_f a los aportes de fuentes y sumideros, que posteriormente se modelan como pozos, para el fluido $f = \{o : \text{aceite}, g : \text{gas}, w : \text{agua}\}$.

En el BOM se establece, también, que los fluidos tienen una compresibilidad, es decir que cambian su volumen debido a cambios de presión o transferencia de masa a otros fluidos (gas). La propiedad que se asocia a ese cambio de volumen es el factor volumétrico (B_f).

(Poner suposiciones del *Black Oil*)

2.3.2. Condiciones iniciales

En el desarrollo de esta Tesis de Maestría, se consideran yacimientos con condiciones de borde cerradas o Neumann cero para todas las fronteras. Es decir, no existen acuíferos aportando presión o caudal en yacimiento. Las diferencias de presión se generan por la presencia de pozos productores e inyectores. En la figura **2-2** se ejemplifica un yacimiento

con condiciones de borde cerradas.

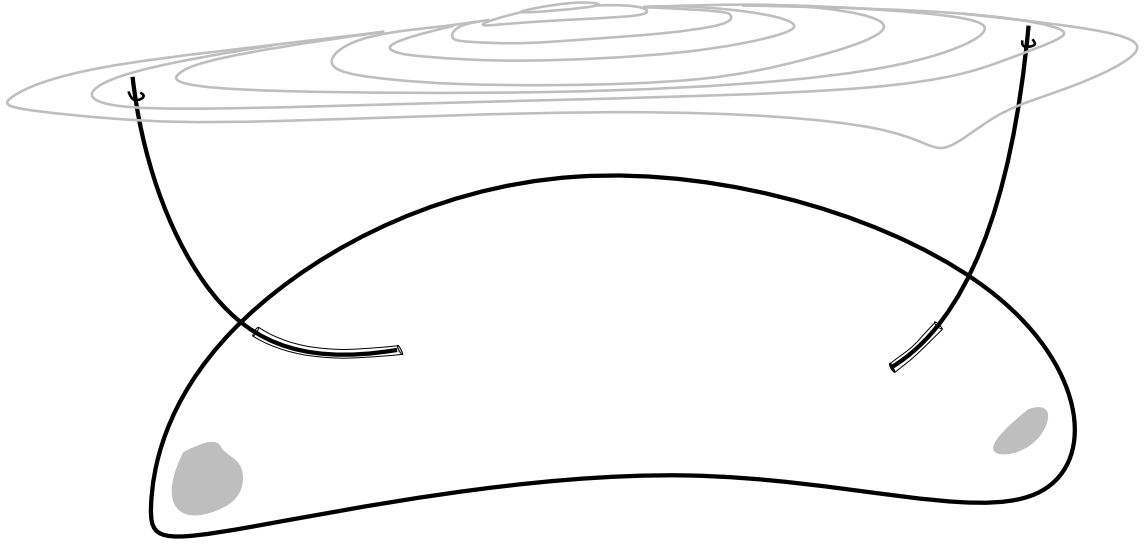


Figura 2-2.: Esquemático de un yacimiento cerrado. Los autores.

Además para un tiempo $t = 0$ se tiene que:

$$P_f(\vec{x}, 0) = P_f^0(\vec{x}) \quad \forall f \in \{o, g, w\} \quad (2-7)$$

$$S_f(\vec{x}, 0) = S_f^0(\vec{x}) \quad \forall f \in \{o, g, w\} \quad (2-8)$$

Es decir, existe funciones en el espacio que describen las condiciones iniciales de presión $P_f^0(\vec{x})$ y saturación $S_f^0(\vec{x})$ para los fluidos f del yacimiento.

2.3.3. Discretización

Se elije el método de los volúmenes finitos para las discretización espacial de las ecuaciones 2-4, 2-5 y 2-6 y un esquema implícito para la discretización del tiempo, es decir, elección del tiempo al $n + 1$ (futuro). El proceso de discretización se muestra en el anexo A. Para una celda con índice i con superficie S como un conjunto de caras c , la discretización de las

ecuaciones es la siguiente:

$$\underbrace{\frac{|\Omega_i|}{\Delta t} \left[\phi_i^t \left(\frac{S_{o,i}^t}{B_{o,i}^t} + \frac{Rv_i^t S_{g,i}^t}{B_{g,i}^t} \right) \right]_n^{n+1}}_{\text{Acumulación - Aceite}} + \underbrace{\sum_{c \in S} [T_{o,c}^{n+1} \nabla \Phi_{o,c}^{n+1} + Rv_c T_{g,c}^{n+1} \nabla \Phi_{g,c}^{n+1}]}_{\text{Flujo - Aceite}} + \dot{Q}_{o,i}^{n+1} = 0 \quad (2-9)$$

$$\underbrace{\frac{|\Omega_i|}{\Delta t} \left[\phi_i^t \left(\frac{S_{g,i}^t}{B_{g,i}^t} + \frac{Rs_i^t S_{o,i}^t}{B_{o,i}^t} \right) \right]_n^{n+1}}_{\text{Acumulación - Gas}} + \underbrace{\sum_{c \in S} [T_{g,c}^{n+1} \nabla \Phi_{g,c}^{n+1} + Rs_c T_{o,c}^{n+1} \nabla \Phi_{o,c}^{n+1}]}_{\text{Flujo - Gas}} + Q_{g,i}^{n+1} = 0 \quad (2-10)$$

$$\underbrace{\frac{|\Omega_i|}{\Delta t} \left[\phi_i^t \left(\frac{S_{w,i}^t}{B_{w,i}^t} \right) \right]_n^{n+1}}_{\text{Acumulación - Agua}} + \underbrace{\sum_{c \in S} [T_{w,c}^{n+1} \nabla \Phi_{w,c}^{n+1}]}_{\text{Flujo - Agua}} + Q_{w,i}^{n+1} = 0 \quad (2-11)$$

dónde:

$$\begin{aligned} \left[\phi_i^t \left(\frac{S_{o,i}^t}{B_{o,i}^t} + \frac{Rv_i^t S_{g,i}^t}{B_{g,i}^t} \right) \right]_n^{n+1} &= \phi_i^{n+1} \left(\frac{S_{o,i}^{n+1}}{B_{o,i}^{n+1}} + \frac{Rv_i^{n+1} S_{g,i}^{n+1}}{B_{g,i}^{n+1}} \right) - \phi_i^n \left(\frac{S_{o,i}^n}{B_{o,i}^n} + \frac{Rv_i^n S_{g,i}^n}{B_{g,i}^n} \right), \\ \left[\phi_i^t \left(\frac{S_{g,i}^t}{B_{g,i}^t} + \frac{Rs_i^t S_{o,i}^t}{B_{o,i}^t} \right) \right]_n^{n+1} &= \phi_i^{n+1} \left(\frac{S_{g,i}^{n+1}}{B_{g,i}^{n+1}} + \frac{Rs_i^{n+1} S_{o,i}^{n+1}}{B_{o,i}^{n+1}} \right) - \phi_i^n \left(\frac{S_{g,i}^n}{B_{g,i}^n} + \frac{Rs_i^n S_{o,i}^n}{B_{o,i}^n} \right), \\ \left[\phi_i^t \left(\frac{S_{w,i}^t}{B_{w,i}^t} \right) \right]_n^{n+1} &= \phi_i^{n+1} \left(\frac{S_{w,i}^{n+1}}{B_{w,i}^{n+1}} \right) - \phi_i^n \left(\frac{S_{w,i}^n}{B_{w,i}^n} \right) \end{aligned}$$

El término $T_{f,c}$ en la ecuación 2-12 corresponde a la transmisividad en una cara c que conecta una celda i con otra celda j .

$$T_{f,c} = \left(\frac{1}{(\Delta l_i / A_c K_{l,i}) + (\Delta l_j / A_c K_{l,j})} \right) \frac{kr_{f,c}}{\mu_{f,c} B_{f,c}} \quad (2-12)$$

2.3.4. Modelado de Pozos

Al establecer condiciones de frontera cerradas es necesario perforar pozos para generar diferencias de presión que induzcan al transporte de los hidrocarburos presentes en el yacimiento. Los pozos tienen dos tipos, inyector o productor.

$$q^{(v)} = \sum_{m=1}^{M_w^{(v)}} \frac{2\pi\rho\sqrt{k_{xx}k_{yy}}h_z}{\mu(r_e/r_w + s)} \left(p_{bh}^{(v)} - p_m - \gamma \left(z_{bh}^{(v)} - z_m \right) \right) \delta(x - x_m^{(v)}) \quad (2-13)$$

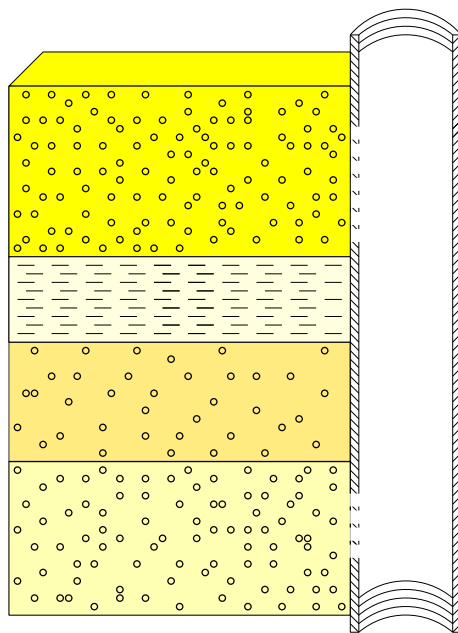


Figura 2-3.: Esquemático de pozo multiperforado. Los autores.

2.3.5. Método de Newton-Raphson

El sistema de ecuaciones algebraicas formado por 2-9, 2-10 y 2-11 es no lineal. Por lo tanto, se aplica el método del Newton-Raphson el cual se usa para encontrar las raíces de una ecuación no lineal aproximándose por su derivada, como se ilustra en la imagen **2-4**.

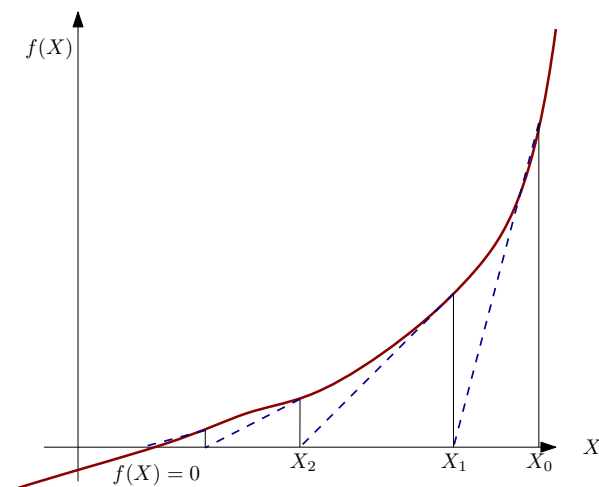


Figura 2-4.: Aproximación a la derivada de una función. Los autores.

$$A \cdot \Delta \vec{x} = \vec{b} \Leftrightarrow J_{i,j}^k \cdot \Delta \vec{x} = -\vec{R}_i^k \quad (2-14)$$

$$\Delta \vec{x} = \vec{x}^{k+1} - \vec{x}^k = (\Delta P_o, \Delta S_g, \Delta S_w)^T \quad (2-15)$$

$$-\vec{R}_i^k = \left(\Delta R_{P_o,i}^k, \Delta R_{S_g,i}^k, \Delta R_{S_w,i}^k \right)^T \quad (2-16)$$

$$J_{i,j}^k = \frac{\partial R_i^k}{\partial x_j^k} \quad (2-17)$$

$$\frac{\partial R^k}{\partial x^k} \approx \frac{R(x^k + \xi) - R(x^k)}{\xi} \quad (2-18)$$

2.4. Esquemas Preconceptuales

Los Esquemas Preconceptuales (EP) son representaciones intermedias entre el lenguaje natural y un esquema conceptual o un lenguaje formal. Estos esquemas contienen todo el dominio de aplicación de un interesado, y por tanto, sirven para establecer un punto común de entendimiento entre un interesado y un analista de software (Zapata, 2007). Los EP se desarrollan con la idea de mantener la coherencia y consistencia entre el discurso del interesado y el software que se desarrolla.

2.4.1. Elementos del Esquema Preconceptual

Zapata (2012) define los elementos del EP tal como se observa en la figura 2-5 para la representación del dominio del interesado. Estos elementos se dividen en cuatro categorías: nodos, relaciones, enlaces, y aglutinadores.

Nodos

- **Concepto:** Los conceptos son sustantivos o sintagmas nominales que representan un actor u objeto dentro del dominio del interesado, se subclasifican en conceptos clase y conceptos hoja, según su jerarquía (Zapata, 2007, 2012).
- **Condiciona:** Los condicionales establecen cuando ejecutar una relación dinámica o una especificación a partir de una expresión lógica formada por conceptos o variables, operadores, y valores o parámetros (Zapata, 2007, 2012).
- **Operador:** Los operadores son símbolos lógicos o matemáticos que sirven para formar expresiones a evaluar (Zapata, 2012).
- **Asignación:** Sirve para asignar el valor que resulta de una expresión matemática o lógica (Zapata, 2012).

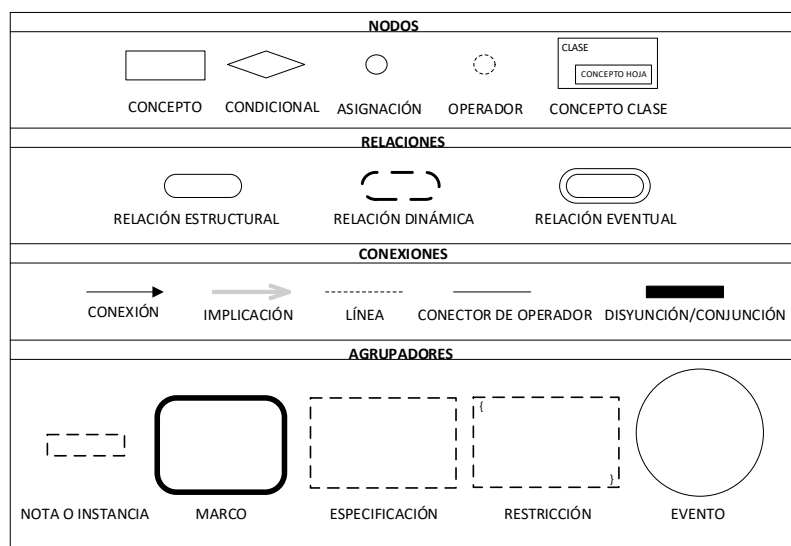


Figura 2-5.: Elementos del EP. (Zapata, 2012).

- **Concepto Clase:** Sirve para representar el acceso a un concepto hoja o atributo desde su concepto contenedor (Zapata, 2007).

Relaciones

- **Relación Estructural:** Relaciones permanentes entre dos conceptos, se asocian a los verbos “ser” o “tener” y establecen generalización o agregación, respectivamente (Zapata, 2007, 2012).
- **Relación Dinámica:** Se asocian a verbos que denotan acción u operaciones que modifican el dominio de estudio, establecen relaciones transitorias entre el concepto ejecutor de la acción con el concepto objeto de dicha acción (Zapata, 2007, 2012).
- **Relación Eventual:** Se relaciona con un verbo que denota ocurrencia, el cuál no se asocia a un concepto ejecutor. (Noreña et al., 2018; Zapata, 2012).

Enlaces

- **Conexión:** Es una flecha unidireccional que sirve para conectar conceptos con relaciones dinámicas o estructurales (Zapata, 2007, 2012).
- **Implicación:** Es una línea continua y dirigida que sirve para indicar una relación causa-efecto u orden entre relaciones dinámicas, condicionales o eventos. (Zapata, 2007, 2012).
- **Concepto-Nota:** Sirve para conectar un concepto a una nota o instancia (Zapata, 2007, 2012).

- **Conector de Operador:** Sirve para conectar un valor, concepto, atributo compuesto u otros operadores, a un operador (Zapata, 2012).
- **Conjunción/Disyunción:** Sirve para agrupar o bifurcar implicaciones, estableciendo una causalidad conjunta o múltiples efectos (Zapata, 2007, 2012).

Aglutinadores

- **Nota o Instancia:** Sirve para limitar los valores para un concepto a un conjunto predefinido (Zapata, 2007, 2012).
- **Especificación:** Sirve para agrupar un conjunto de operaciones que describen una relación dinámica o eventual (Zapata, 2012).
- **Marco:** Sirve para asociar múltiples relaciones dinámicas a una responsabilidad o para agrupar conceptos (Zapata, 2012).
- **Restricción:** Sirve para establecer una condición sobre una especificación de operaciones (Zapata, 2012). Adicionalmente, se usa para establecer ciclos sobre conceptos o condiciones (Chaverra, 2011).
- **Evento:** Es una ocurrencia que habilita cambios de estado en los procesos (Zapata et al., 2013).

2.4.2. Esquemas Preconceptuales en el contexto del software científico

Calle (2016); Noreña & Zapata (2018b) descubren la capacidad del EP para representar aplicaciones en el contexto del software científico. Para ello, definen elementos adicionales que permiten modelar dominios de mayor complejidad. En esta Tesis de Maestría se usan las condiciones iniciales, conceptos tipo arreglo, parámetros, variables, vectores, operadores predefinidos, operador “push”, operador “type”, y funciones definidas por el analista. En la figura 2-6 se presenta la representación de los elementos previamente mencionados. A continuación, se explican los elementos adicionales que se usan en el desarrollo de esta tesis.

Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales son una especificación, de variables y parámetros globales, que se conoce desde el inicio de la simulación (Noreña & Zapata, 2018b). Un ejemplo de uso se presenta en la figura 2-7.

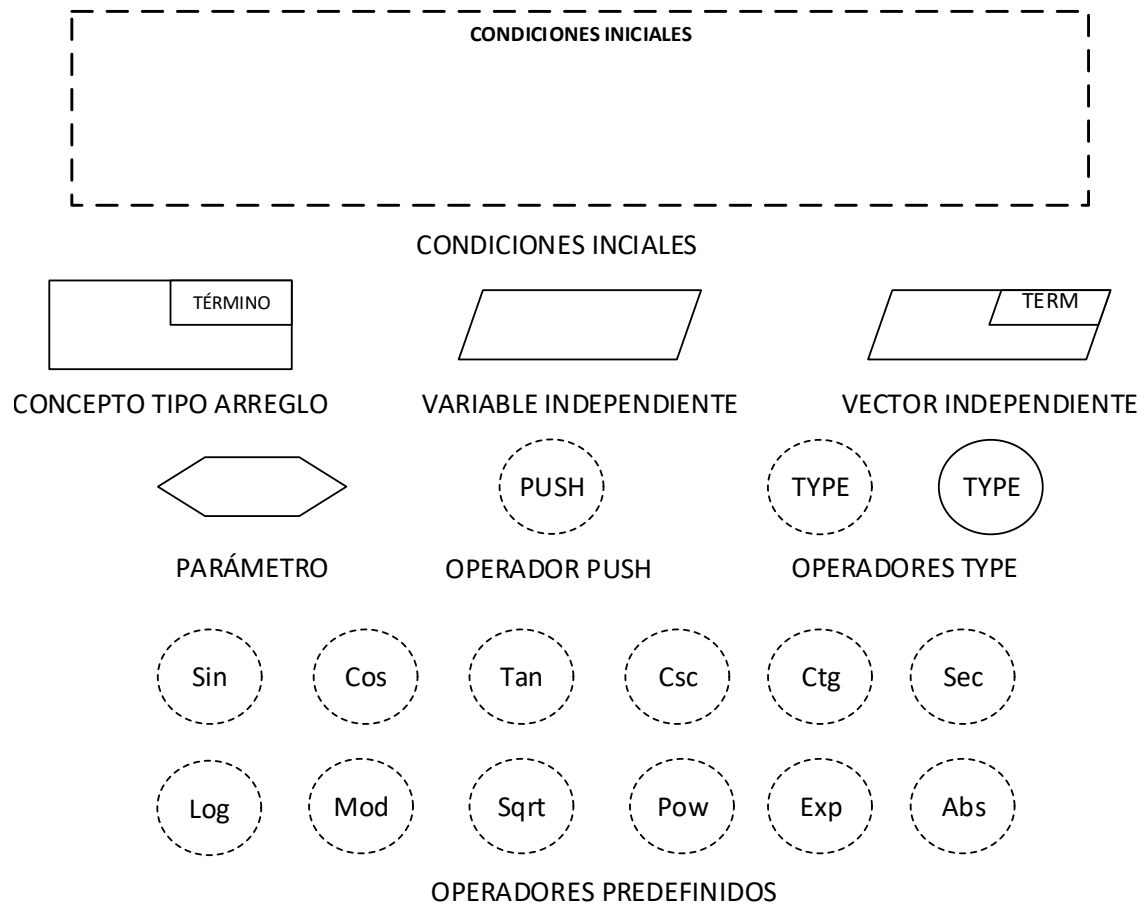


Figura 2-6.: Elementos para la representación de Software Científico. (Calle, 2016; Noreña & Zapata, 2018b).

Concepto tipo arreglo

Los conceptos tipo arreglo permiten almacenar de manera permanente múltiples valores, y a su vez, iterar sobre ellos (Calle, 2016). En esta tesis de maestría se usan conceptos tipo arreglos multidimensionales. En la figura 2-8 se expone un ejemplo de su uso.

Parámetro

Los parámetros se usan para almacenar constantes o definir entradas en la especificación de relaciones dinámicas, especificaciones de tipo marco y, funciones, que reciben múltiples argumentos o parámetros (Calle, 2016; Noreña & Zapata, 2018b). Se expone un ejemplo de uso en 2-9.

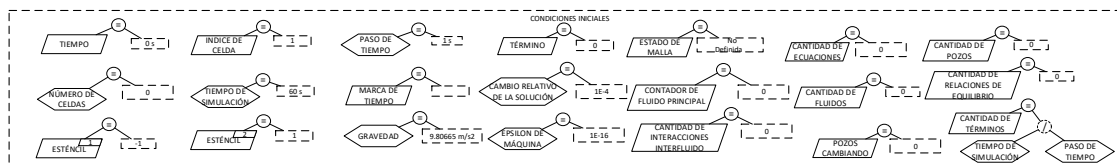


Figura 2-7.: Condiciones Iniciales. Los autores.

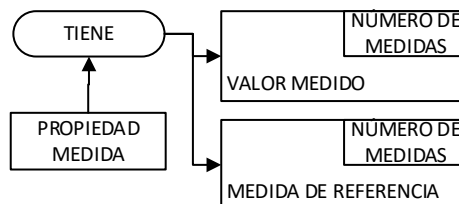


Figura 2-8.: Conceptos tipo arreglo. Los autores.

Variable Independiente

Las variables independientes permiten almacenar valores durante la ejecución de una especificación sin estar acopladas a un concepto. Si se definen en las condiciones iniciales, se pueden usar de manera global durante toda la simulación (Noreña & Zapata, 2018b). En la figura 2-7 se pueden ver ejemplos de variables independientes.

Vector independiente

Los vectores independientes cumplen la misma tarea y propiedades de las variables independientes pero permiten almacenar más de un valor (Noreña & Zapata, 2018b). Un ejemplo de vector independiente se presenta en 2-10.

Operadores Predefinidos

Son funciones algebraicas y trigonométricas predefinidas que se pueden usar como operadores en el EP (Calle, 2016).

Operador Push

El operador Push sirve para insertar, valores, conceptos o parámetros dentro de un concepto tipo arreglo, el elemento que se inserta queda en la última posición del arreglo (Calle, 2016).

Operador Type

El operador Type tiene dos versiones, una como operador de asignación y otro como operador de información. En el caso de la asignación, sirve para otorgarle el tipo de una subclase a

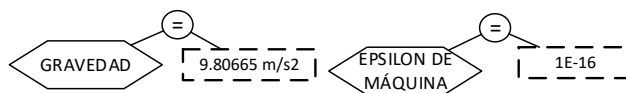


Figura 2-9.: Ejemplo de parámetros. Los autores.

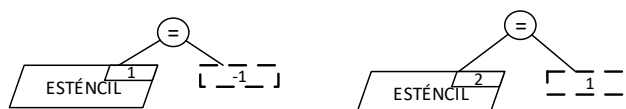


Figura 2-10.: Ejemplo de vector independiente. Los autores.

un concepto. Mientras que en el de información, consulta si el tipo del concepto corresponde con el tipo de una subclase definida (Calle, 2016).

Funciones definidas por el analista

Las funciones definidas por el analista son especificaciones reutilizables en el EP a modo de un operador personalizado cuyo nombre define el analista. Éstas funciones llevan en su especificación un concepto “return” que corresponde al valor que devuelve la función al ser usada como operador (Calle, 2016). En la figura 2-11 se presenta un ejemplo de definición y uso de una función definida por el analista.

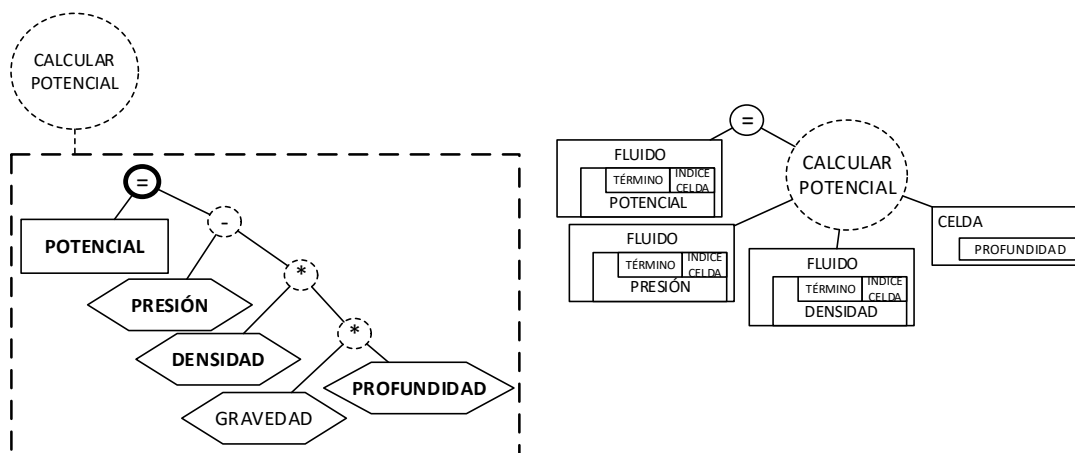


Figura 2-11.: Ejemplo de función, cálculo del potencial. Los autores.

3. Planteamiento del Problema

3.1. Antecedentes

A continuación se mencionan los autores que presentan modelos matemáticos en el área de la simulación de procesos de recobro mejorado e ilustran el dominio de aplicación con diversas representaciones. Valencia (2016); Valencia et al. (2018) desarrollan un modelo de simulación para la generación de espumas *in situ* inyectando químicos dispersos en gas. En este trabajo, describen los fenómenos físicos y mecanismos, de los fluidos y del químico inyectado, que se presentan en el yacimiento. Adicionalmente, presentan las ecuaciones de su modelo matemático y un diagrama de flujo del proceso de solución de las mismas. Sin embargo, los conceptos que se enuncian en su modelo conceptual y matemático no son trazables en sus diagramas y no tienen representación de los eventos que resultan de los fenómenos físicos que se modelan.

Mozo (2017) elabora un modelo de inyección de nanopartículas para la estimulación de pozos. En su trabajo, emplea un modelo conceptual para explicar los fenómenos que se describen en su modelo matemático, además, explica el proceso de solución de las ecuaciones de su modelo por medio de un algoritmo. Este trabajo también carece de trazabilidad en los conceptos que se explican. Isaza (2017) desarrolla un modelo de remediación del daño generado por asfaltenos, en este se presenta el modelo conceptual para una simulación de tipo *Black Oil* agregándole el transporte de los asfaltenos en el petróleo y su transferencia a la roca. En éste trabajo, también se presenta un algoritmo genérico de solución de las ecuaciones que se muestran en el modelo matemático.

Por último, Solano et al. (2019), presenta un modelo de generación de espumas para aplicación en yacimientos naturalmente fracturados, en este trabajo se desarrolla un *Black Oil Model* con inyección de un surfactante disperso en una corriente de gas. Para describir los fenómenos físicos que Solano et al. (2019) modelan en el trabajo, presentan un mapa conceptual y las ecuaciones de su modelo matemático. Este trabajo carece de trazabilidad en el proceso de solución de las ecuaciones.

Los siguientes autores elaboran *frameworks* de simulación de yacimientos de petróleo. Sus esfuerzos, en su mayoría, se enfocan en la velocidad de computo y procesamiento paralelo. Zaza et al. (2016) presenta un simulador Black Oil en paralelo utilizando la arquitectura

CUDA. En este trabajo, Zaza et al. (2016) muestra en un diagrama general, la descripción de cómo se resuelven las ecuaciones de su modelo matemático, involucrando los conceptos que se relacionan con cada etapa de la solución. En éste trabajo, también se muestra el esquema de solución, involucrando conceptos del modelo matemático. Sin embargo, no todos los conceptos son trazables en su esquema de solución.

Wang et al. (2016, 2017) desarrolla un simulador *Black Oil* en paralelo para múltiples dominios continuos que considera modelos de fracturas discretas en yacimientos no convencionales. En este trabajo se presentan todas las ecuaciones del modelo matemático que relaciona los múltiples dominios, aunque carece de representaciones que agrupen los conceptos, fenómenos físicos y procesos de solución. Fang et al. (2017) desarrollan un modelo flujo entre dos dominios para un sólo fluido. En éste, se calcula un sistema de mallas mezcladas y se definen términos de transmisividad media y total para las transferencias del fluido entre los dominios. En este trabajo, se ilustra un diagrama del proceso de solución de los dos dominios de flujo. Sin embargo, este no acopla todos los conceptos que se definen. Qiao et al. (2017) presentan un *framework* multipropósito basado en un modelo composicional para flujo reactivo, en éste desarrollan todo el modelo matemático y explican cómo acoplar nuevos fenómenos. Sin embargo, no tienen elementos de trazabilidad de conceptos ni del proceso de solución de sus ecuaciones.

Flemisch et al. (2011) desarrollan un *framework* de simulación de yacimientos sobre DUNE (Blatt et al., 2016). La herramienta tiene la capacidad de simular flujo en dos fases con un modelo de múltiples medios continuos (MINC). Las variables de los modelos se pueden resolver de manera completamente implícita y acoplada o de manera secuencial. En su trabajo presentan una representación del proceso con los detalles de implementación de los modelos. Sin embargo, no existen elementos que permitan trazar los conceptos presentes en sus modelos matemáticos.

Existen otros trabajos como los de Cao (2002), DeBaun et al. (2005) y Zhang et al. (2007) que tienen elementos de trazabilidad tanto de conceptos como del proceso. Sin embargo, estos son específicos de la manera en la que implementan sus *frameworks*. Adicionalmente carecen de elementos para representar eventos que emergen de los fenómenos físicos que se estudian.

En tabla **3-1** se muestra una síntesis de la revisión de literatura de modelos ejecutables para la simulación de yacimientos de petróleo. Se destaca que existen algunos elementos de trazabilidad, tanto conceptual como del proceso, en los trabajos que se revisan. Sin embargo, faltan elementos de acople que garanticen la cohesión y consistencia de los modelos matemáticos con el método de solución de los mismos. También se evidencia que los trabajos carecen de representación de los eventos que surgen de caracterizar los

fenómenos físicos que se estudian en cada trabajo.

| AUTORES | Enfoques | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Modelos matemáticos | Trazabilidad de conceptos | Trazabilidad del proceso | Representación de eventos |
| Valencia (2016) | x | | | |
| Valencia et al. (2018) | x | | | |
| Mozo (2017) | x | | x | |
| Isaza (2017) | x | | x | |
| Solano et al. (2019) | x | x | | |
| Zaza et al. (2016) | x | | x | |
| Wang et al. (2016, 2017) | x | | | |
| Fang et al. (2017) | x | | x | |
| Qiao et al. (2017) | x | | | |
| Flemisch et al. (2011) | x | | x | |
| Cao (2002) | x | x | x | |
| DeBaun et al. (2005) | x | x | x | |
| Mohammad et al. (2017) | x | | | |
| Wang et al. (2015) | x | | | |
| Zhang et al. (2007) | x | x | x | |
| Wang et al. (2016) | x | | | |
| Hu et al. (2013) | x | | | |
| Zaydullin et al. (2014) | x | | | |

Tabla 3-1.: Síntesis de la revisión de literatura. Los autores.

3.2. Problema

La simulación de procesos de recobro mejorado requiere la elaboración y solución de modelos matemáticos complejos (Ertekin et al., 2001). Éstos involucran múltiples conceptos que describen los fenómenos físicos, y, que pueden estar presentes en diferentes ecuaciones. Las ecuaciones, a pesar de ser una representación formal, no contienen toda la información relevante a la simulación, por lo que se pierde la trazabilidad de los conceptos que se requieren para representar los fenómenos físicos correctamente. Adicionalmente, existe diversidad de técnicas para solucionar los modelos matemáticos que se elaboran. Por ésta razón, hay poca trazabilidad en los procesos de solución. Todo esto repercute en que los simuladores de yacimientos para procesos EOR se desarrollen de manera empírica, sin

seguir un estándar.

Los esquemas preconceptuales son una herramienta que permite representar dominios de conocimiento. Estos, mantienen la cohesión de los elementos presentes en un dominio, puesto que agrupan toda su estructura. Adicionalmente, el mismo esquema sirve para representar el comportamiento dinámico o los procesos que se dan en dicho dominio. Recientes trabajos, muestran el potencial de los esquemas preconceptuales para representar dominios de aplicación en el área del software científico.

Por ejemplo, Noreña & Zapata (2018a) representan eventos temporales usando EPs, y lo ejemplifican con la simulación de un sensor que toma mediciones de temperatura constantemente y modifica el estado de una alerta. Más aún, Noreña & Zapata (2018b) hace uso de los eventos del esquema preconceptual en la representación de eventos determinísticos y aleatorios del tipo señal para un sistema de red de telefonía celular. Posteriormente, Noreña & Zapata (2019) utiliza los esquemas preconceptuales para representar la simulación de una bodega de comida de mar, su proceso de refrigeración y la toma de decisiones respecto a aceptar o no envíos de comida.

Los EPs aportan la cohesión, consistencia, trazabilidad en los conceptos y en el proceso que se requieren para formalizar el desarrollo de un simulador de yacimientos de petróleo para procesos de recobro mejorado. Además, tienen elementos para la representación de eventos. Adicionalmente, durante la construcción del EP se realiza un proceso mayéutico en el cuál se ahonda en el significado fundamental de los conceptos en los fenómenos físicos que se involucran, eliminando la ambigüedad en la representación del dominio.

3.3. Objetivos

3.3.1. Objetivo general

En esta Tesis de Maestría se desarrolla un modelo ejecutable para la simulación multifísica de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo basado en esquemas preconceptuales.

3.3.2. 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 el modelo ejecutable con un caso de literatura.

4. Propuesta de solución

En este capítulo se propone una representación basada en EP para la simulación de procesos de recobro mejorado. Con este fin, se extiende el elemento "función" definido en los EP para facilitar el desarrollo de la representación del dominio de la simulación de procesos EOR. Adicionalmente, se conceptualizan los términos derivados de las ecuaciones presentadas en el marco teórico. Posteriormente, se muestra el EP completo de la simulación y se explica por secciones los eventos que procesan la simulación.

Esta sección se estructura así: en la sección 4.2 se presentan las subrutinas definidas por el usuario como una extensión para las funciones de los EP que permite reutilizar una representación en múltiples secciones del EP y la regla para la obtención de código a partir del nuevo elemento. En la sección 4.3 se revisan los términos de cada ecuación y su traducción a los conceptos presentes en el EP junto con sus respectivas relaciones estructurales y dinámicas. En la sección 4.4 se muestra el EP completo y se explican los eventos que procesan la simulación.

4.1. Modelo ejecutable para la simulación multifísica de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo basado en esquemas preconceptuales

(Acá debo hablar del proceso tal como lo voy guiando en el esquema preconceptual, es decir, la cadena de implicaciones explicando el paso a paso. Debo reorganizar la información y darle la importancia que se merece a los elementos que estoy GENERALIZANDO!)

4.2. Extensión a las Funciones del Esquema Preconceptual

4.2.1. Subrutinas definidas por el analista

Las subrutinas definidas por el analista son funciones tal como Calle (2016) propone, pero carecen de un concepto retorno "return". Estas utilizan elementos globales y también pueden recibir parámetros adicionales, su representación gráfica es igual a la de una función, pero

en su uso no hay una asignación. En la figura ?? se presenta la representación gráfica y su traducción a código.

4.3. Conceptualización

En esta sección se explican los conceptos principales que resultan en la traducción de las ecuaciones algebraicas resultantes de la discretización del BOM extendido y las ecuaciones constitutivas usando el método de los volúmenes finitos. En la figura 4-1 se presentan los conceptos a explicar.

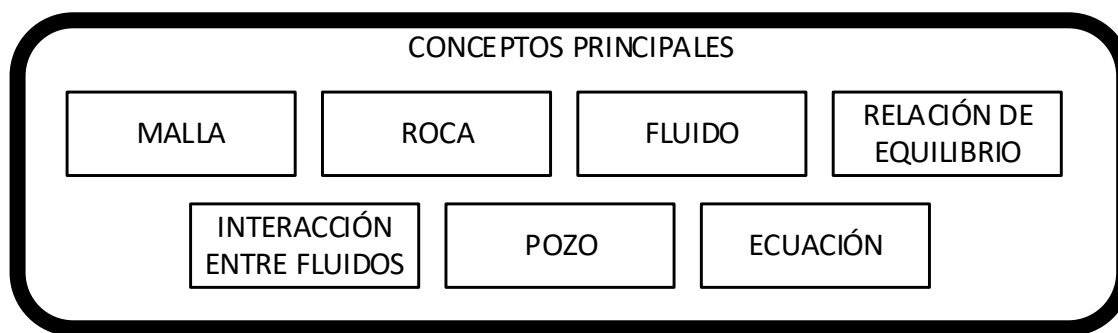


Figura 4-1.: Conceptos principales en la simulación. Los autores.

4.3.1. Malla

Al resolver el dominio espacial continuo como un conjunto discreto de celdas (discretizar el espacio), aparecen propiedades tales como los volúmenes de las celdas y el área de las caras. Este conjunto discreto de celdas es el que se denomina como “malla”. A su vez, la celda es vista como un conjunto discreto de caras que generan una superficie cerrada¹. Cada celda cuenta con una numeración, esta sirve para identificar posiciones en el espacio y ubicar las vecindades correspondientes para el cálculo del flujo discretizado.

De la conceptualización de los elementos emergentes en la discretización, se encuentra que existe una malla. La cual, contiene todas las propiedades necesarias para generar el conjunto de celdas. Además, existe un actor “Geomodelador” que se encarga de definir el número de celdas en cada eje, sus espesores y topes tal como se presenta en 4-2.

Una vez definidas tales propiedades, la malla aparece en un proceso iterativo de creación de la cantidad de celdas (Esta se presenta en el siguiente capítulo). y el respectivo cálculo de volúmenes, profundidades y numeración para cada una. Posteriormente, las caras se crean

¹En el caso tridimensional

en otro proceso iterativo, estas contienen la información sobre las vecindades de cada celda, donde cada celda tiene un conjunto de caras².

4.3.2. Roca

La especificación de la relación dinámica “Petrofísico caracteriza roca” consiste de insertar las condiciones iniciales de porosidad y permeabilidad absoluta para la roca asociada al yacimiento, es posible notar que estos atributos de la roca están representados como arreglos por la cantidad de términos, derivados de los pasos de tiempo (estos se verán más adelante), y la cantidad de celdas definidas en la malla.

Adicionalmente, el petrofísico define la compresibilidad de poro y la presión a la que esta se mide para el cálculo de la porosidad a los términos posteriores. El modelo considera la existencia de una única roca a la cual todas las propiedades por cada una de las celdas son asignadas. La caracterización de la roca se presenta en **4-3**.

4.3.3. Fluido

Los fluidos tienen propiedades que son funciones de su presión y saturación, estas a su vez son función del tiempo y del espacio. Por lo que todas las propiedades que se proponen en la conceptualización se representan como arreglos dependientes de la cantidad de términos y de la cantidad de celdas, tal como se presenta en la figura **4-4**. La representación del fluido, su relación dinámica “Ingeniero de fluidos caracteriza Fluido” y su respectiva especificación se presentan en la figura **4-5**.

En pos de la generalidad, la viscosidad del fluido y su factor volumétrico se definen como funciones directas de la presión. Con este fin, aparece el concepto de “propiedad medida”, el cuál tiene una “medida de referencia” y un “valor medido” a esa referencia. Ambos son arreglos de la “cantidad de medidas”. En la figura **4-5** también es posible ver que el fluido tiene una “viscosidad medida y un factor volumétrico medido”. Esto nos permite calcular de manera general estas propiedades, independientemente del fluido, como una interpolación en el conjunto de medidas a la presión del fluido correspondiente. El ingeniero de fluidos inserta la viscosidad medida y el factor volumétrico medido cuando caracteriza el fluido.

Es importante notar también, que el fluido tiene un tipo y un atributo de tipo lógico “Principal”. El tipo del fluido permite explicitar que este es “petróleo”, “gas” o “agua”. Sin embargo, el fluido cuyo atributo principal sea “sí” o “true”, resuelve la presión en su respectiva ecuación. Los demás fluidos resuelven su saturación.

²Es posible notar que la cara existente entre dos celdas vecinas se crea dos veces, una por cada celda.

4.3.4. Relación de Equilibrio

En las ecuaciones del BOM se relacionan la posible existencia de masa de gas en el aceite (R_s o gas disuelto), y, en el caso del BOM extendido, la de aceite en el gas (R_v o aceite volatilizado). En el concepto “Relación de equilibrio”, se generaliza la existencia de masa de un fluido dentro de otro fluido como un coeficiente de partición, tal como se muestra en la conceptualización (ver 4.3). Se postula, también, que existe un fluido que aporta masa y otro que la recibe, tal como se ve en 4-6. El coeficiente de partición cumple la mismas condiciones de la viscosidad del fluido y a su vez, tiene un coeficiente de partición medido.

4.3.5. Interacción entre fluidos

Las interacciones entre fluidos se proponen como una generalización de los contactos entre fluidos. En el caso del modelo BOM, se deben especificar dos: los contactos gas-aceite y aceite-agua. En este concepto se relacionan directamente las dependencias de la permeabilidad relativa del fluido principal con su respectivo fluido de referencia en el contacto. Además, para el fluidos cuya incógnita es la saturación, se relaciona la presión del fluido principal con su respectiva presión capilar, con el fin de calcular la presión faltante. Para esto, es necesario saber de antemano cuál fluido es el mojante y cuál es el no mojante. Adicionalmente, todas las propiedades dependientes se calculan a la saturación del fluido de referencia. En la figura 4-7 se presenta la representación propuesta para las interacciones entre fluidos.

4.3.6. Pozo

Se proponen los pozos, de manera análoga a la malla, como un conjunto de perforados que a su vez tienen atributos adicionales como lo son la presión de fondo y el caudal. Estos pozos, tienen una caracterización distinta según el tipo, sea productor o inyector. Además, es posible notar que el pozo es un concepto abstracto, de cuál se instancia uno de los dos tipos. Más aún, los perforados dependerán del tipo de pozo, siendo estos también abstractos, con sus respectivos tipos “perforado inyector” o “perforado productor”. En la figura 4-8 se presenta la representación de los pozos.

La principal diferencia entre los pozos productores e inyectores radica en que el pozo inyector tiene un fluido de inyección. Además, la tasa y el acumulado del pozo inyector sólo dependen de este fluido, mientras que para el pozo productor dependerá de la cantidad de fluidos caracterizados. Estos pozos están sujetos a la restricción de no cambiar su tipo, además para un pozo productor, su conjunto de perforados corresponderá también a perforados productores. Así mismo para los pozos inyectores.

Los pozos funcionan bajo una condición operativa, que permite regular la presión o el caudal al que estos inyectan o producen fluido. Estas condiciones definen si un pozo genera una

ecuación (Peaceman), o si su caudal se puede resolver directamente usando la presión de fondo. Por otro lado, las condiciones operativas pueden variar en el tiempo, por lo que se requiere calcular o resolver el atributo que no está sujeto a la condición operativa cada que se establezca un cambio en esta. Adicionalmente, se reconfigura la simulación cada que se establezca un cambio en la condición operativa.

4.3.7. Ecuación

La ecuación es un concepto agrupador, tanto el fluido como el pozo son ecuaciones (Posteriormente los químicos). Sirve para iterar sobre todos los conceptos que generan un residual en el método de Newton. Tienen un índice y estado. Este último permite que todos los pozos generen ecuación pero no necesariamente se resuelva en el jacobiano. Sólo se resuelven las ecuaciones cuyo estado sea “activo”. (Se verá más adelante).

4.4. Representación en EP de la simulación de procesos EOR

En esta sección se propone una representación basada en un EP para procesos EOR. En el esquema 4-9 se evidencia la solución del BOM discretizado usando volúmenes finitos en una malla cartesiana ortogonal. El paso a paso en la ejecución de los eventos se muestra en 4-10. En el evento “Presión del fluido varía” se desarrollan las iteraciones del método de Newton-Raphson e internamente las iteraciones sobre las celdas requeridas para solucionar el sistema algebraico resultante de la discretización. En las secciones siguientes se explica el EP elaborado en las respectivas porciones correspondientes a eventos, subrutinas y funciones que procesan la simulación de procesos EOR.

Para el correcto desarrollo de la simulación, se establecen las siguientes precondiciones: existe una única malla y una única roca. En el caso de una simulación de dos fluidos debe existir una única interacción entre fluidos. En el caso de tres fluidos deben existir exactamente dos interacciones entre fluidos.

4.4.1. Malla aparece

El evento “Malla aparece” Se dispara cuando el estado de la malla es “Definida”, que sucede justo después de que el geomodelador defina la malla. En este evento, se desarrollan dos ciclos principales. El primer ciclo es anidado por cada eje coordenado, y en total se recorre el número de celdas a definir. En este ciclo, se calculan los volúmenes y profundidades de cada celda, además se asigna un índice único de celda y la numeración en cada eje (x,y,z). La especificación del evento “Malla Aparece” se presenta en la figura 4-1.

En el segundo ciclo principal, se itera sobre las celdas definidas previamente y se calcula la conectividad, es decir la definición de caras. Para esto, se consulta la existencia de celdas adyacentes a la celda actual en todas las direcciones. Si existe una celda en alguna dirección, se crea y calcula su área y orientación. Adicionalmente, a la cara se le asigna un índice y también se le asigna la celda vecina. Es importante notar que cada celda almacena su conjunto de caras, por lo que las caras se duplican.

4.4.2. Tiempo pasa

El evento “Tiempo pasa” se dispara en el momento en que se tiene las suficientes realizaciones de los conceptos para ejecutar la simulación, es decir, se ejecutaron las mínimas relaciones dinámicas para poder disparar el evento, como se ve en la figura ???. En este evento se procesa el inicio y el final de la simulación, incrementando el “tiempo” y “término” al que se van a calcular las propiedades de los conceptos principales.

Se puede observar también que, en este evento se realiza el cálculo de las propiedades iniciales para toda la malla. Debido a que, al término cero, sólo se tienen las propiedades que son insertadas en las relaciones dinámicas ejecutadas previamente. las demás propiedades deben ser calculadas como se presenta en la figura 4-1, puesto que son necesarias para el término de acumulación en las ecuaciones de transporte para todos los fluidos existentes.

4.4.3. Presión del Fluido Varía

En el evento “Presión del Fluido varía” se procesa el núcleo de la simulación. En éste se llevan a cabo las iteraciones del método de Newton-Raphson para converger al próximo paso de tiempo. La especificación de este evento consta de cinco procesos principales: La actualización de propiedades al término actual, el recálculo de las mismas, el cálculo de los residuales en cada iteración, el cálculo de la matriz jacobiana, y la actualización de las incógnitas. La especificación del evento “Presión del Fluido varía” se presenta en la figura 4-13.

Actualización de arreglos de propiedades

En la actualización de propiedades al término actual, se hace un incremento de tamaño y asignación del estimado inicial para el método de Newton-Raphson para todas las celdas de la malla y en todos los fluidos para todas las propiedades dependientes del tiempo. Lo mismo se realiza para los pozos y cada uno de sus perforados. La actualización de propiedades se expone en la figura 4-14.

Recálculo de propiedades de los fluidos

Posteriormente en la figura 4-15 se muestra el recálculo de las propiedades de los fluidos para cada celda. Como el sistema que se resuelve tiene por incógnitas la presión del fluido principal y la saturación de los demás fluidos, es necesario calcular el resto de las propiedades de los fluidos como funciones de estas.

Cálculo de Residuales

Luego se hace un recorrido de todas las ecuaciones, y se calcula el residual dependiendo de si la ecuación es de tipo fluido o de tipo pozo, cabe aclarar que sólo las ecuaciones de tipo pozo pueden tener como estado "Inactivas".

Es importante notar también, que la función ubicar se encarga de calcular la posición correspondiente en el vector residual que agrupa todas las incógnitas a resolver. Además el tipo de residual indica si se debe ubicar como una ecuación de fluido que se evalúa para todas las celdas o sólo es una ecuación de pozo y por tanto una sola fila en las últimas posiciones del residual, tal comportamiento se evidencia en 4-16.

Cálculo de la Matriz del Jacobiano

Siguiendo 4-17

Solución del sistema lineal y actualización de incógnitas

Por último una vez se tiene la matriz del jacobiano construida se soluciona usando el operador "Bigradiante conjugado estabilizado", proveniente de alguna librería, que resuelve el sistema: $Jacobiano * DeltaDeSolucion = -Residual$ como se observa en 4-18. Posteriormente, se actualizan las incógnitas sumándoles el delta de solución de manera acorde al cálculo del residual. Esto se presenta en 4-19.

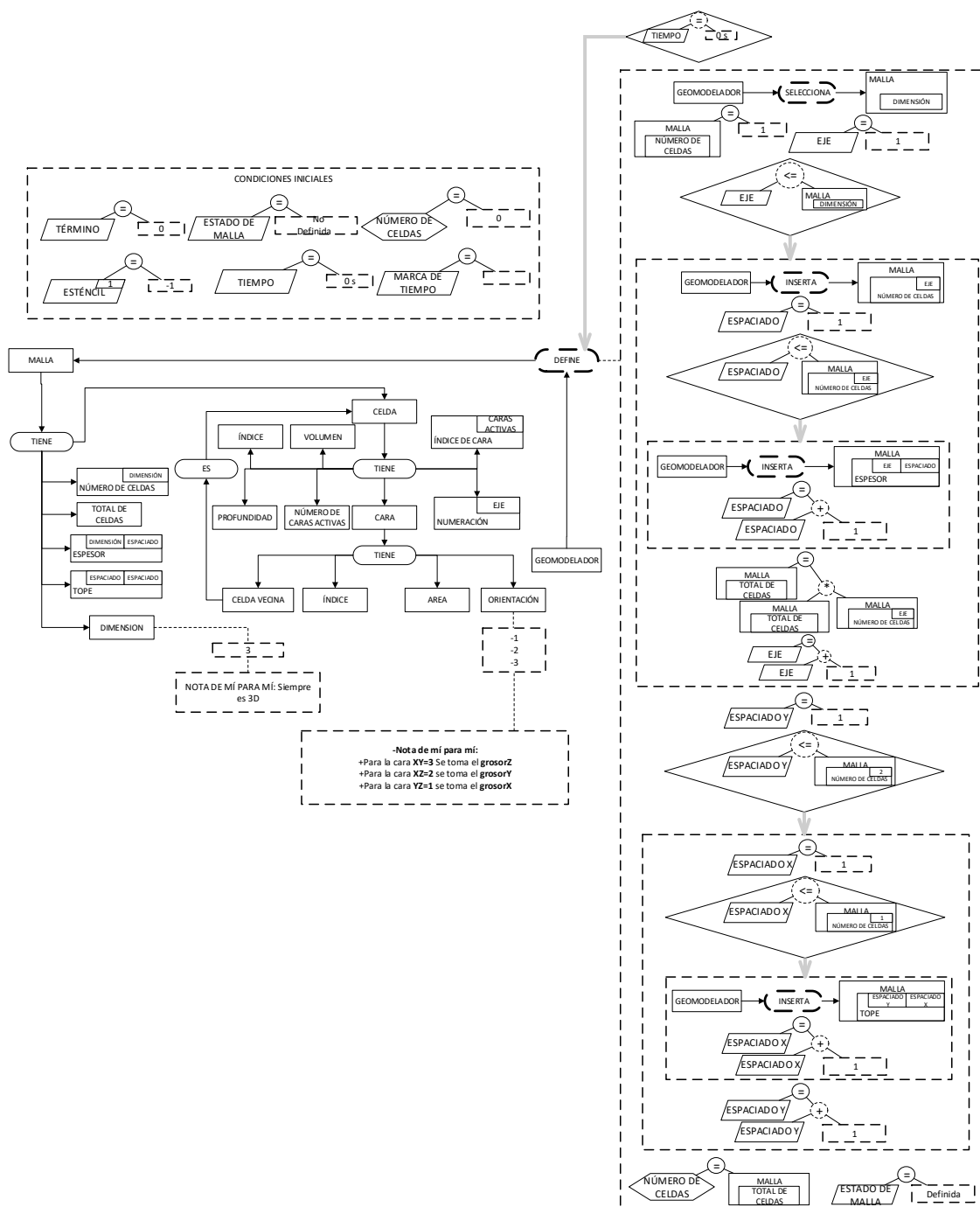


Figura 4-2.: Definición de la malla. Los autores.

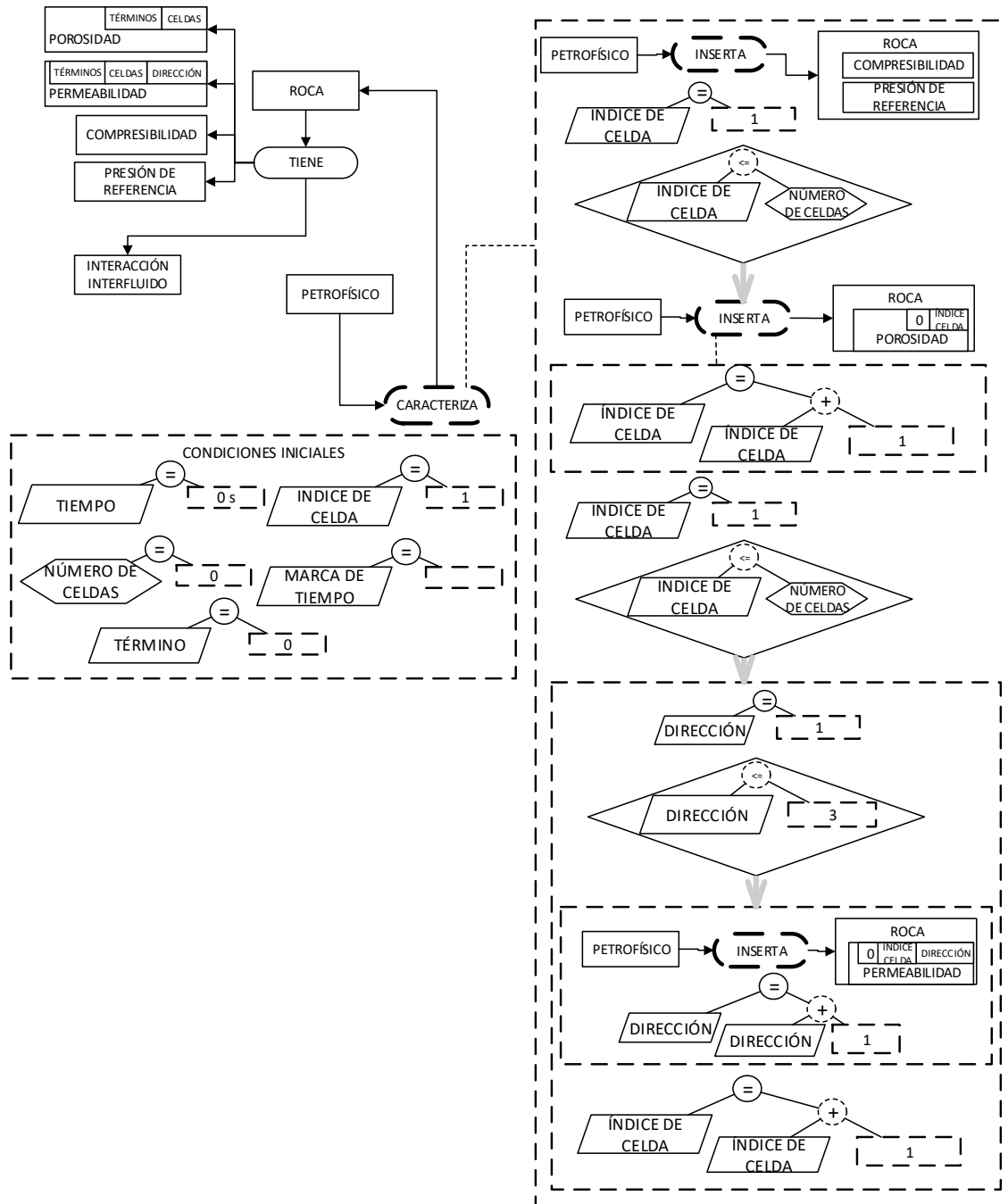
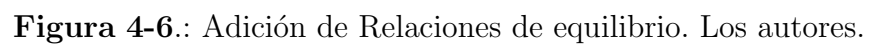


Figura 4-3.: Caracterización de la Roca. Los autores.



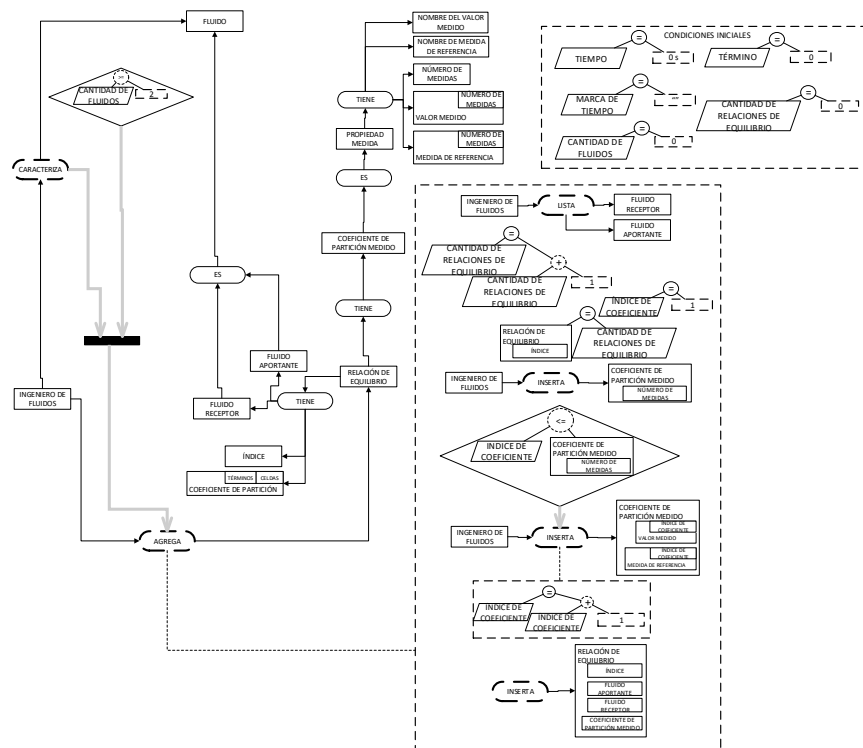


Figura 4-7.: Adición de Interacción entre fluidos. Los autores.

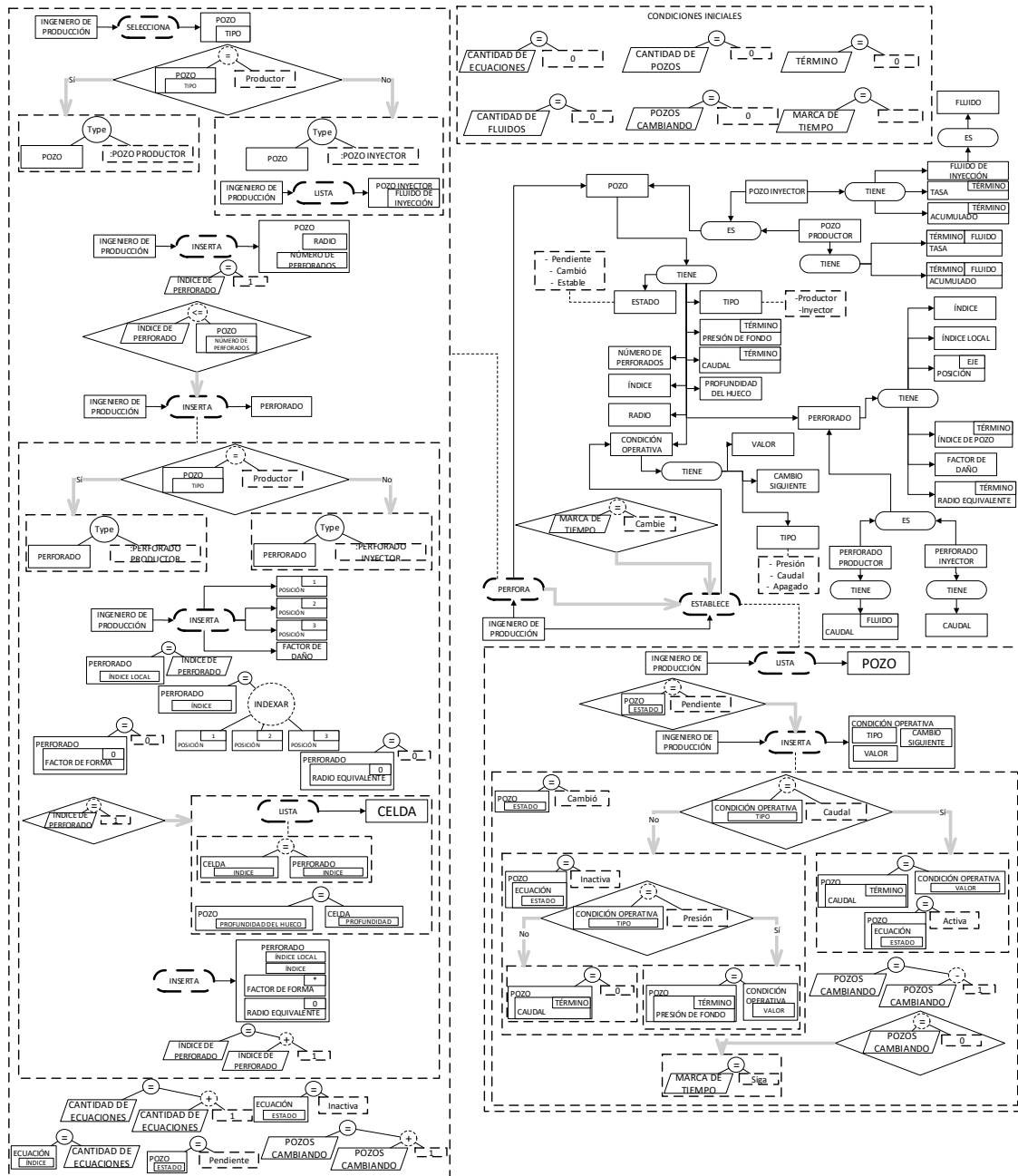


Figura 4-8.: Perforación de Pozos. Los autores.

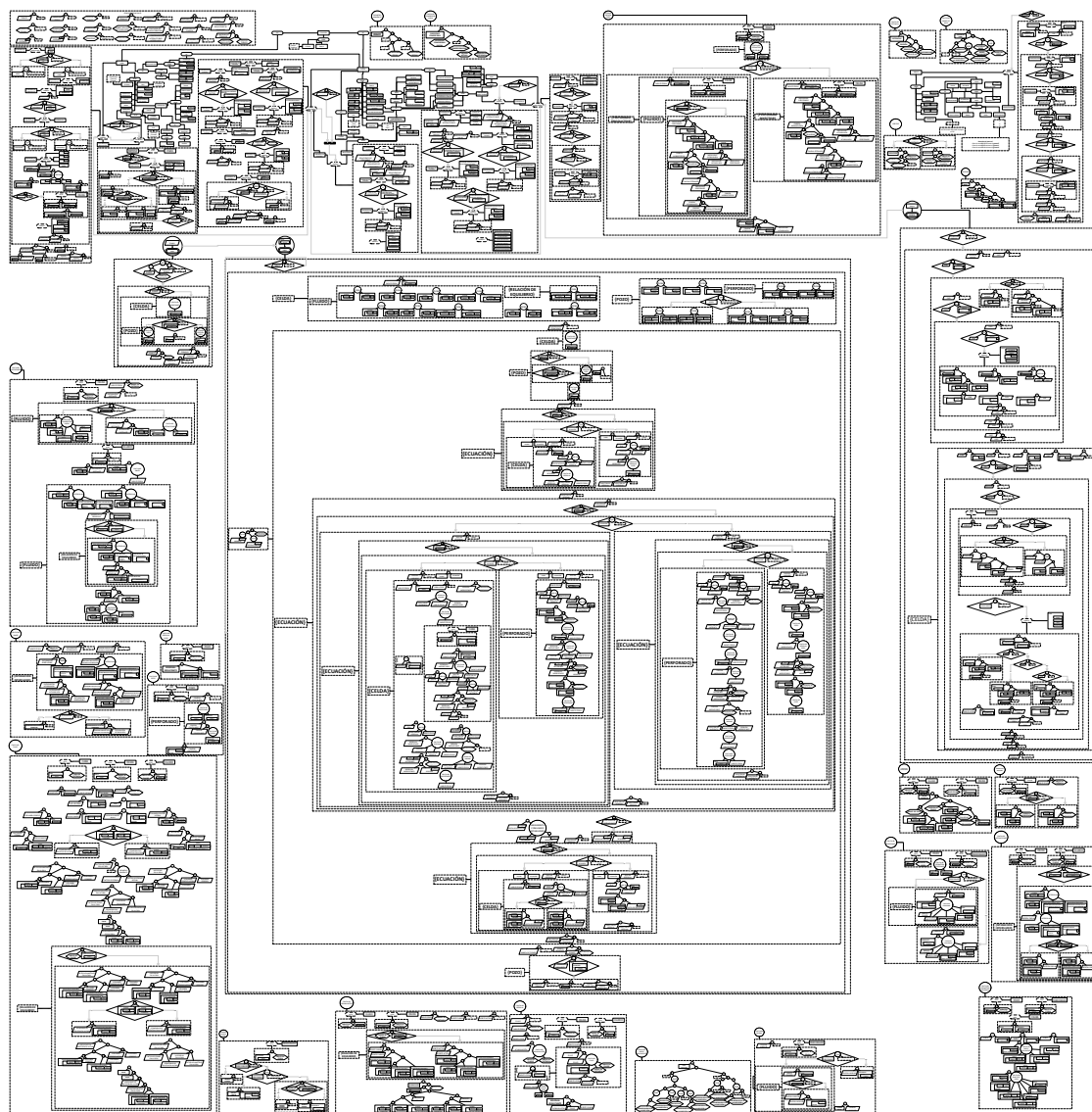


Figura 4-9.: Representación en EP de la simulación de procesos EOR. Los autores.

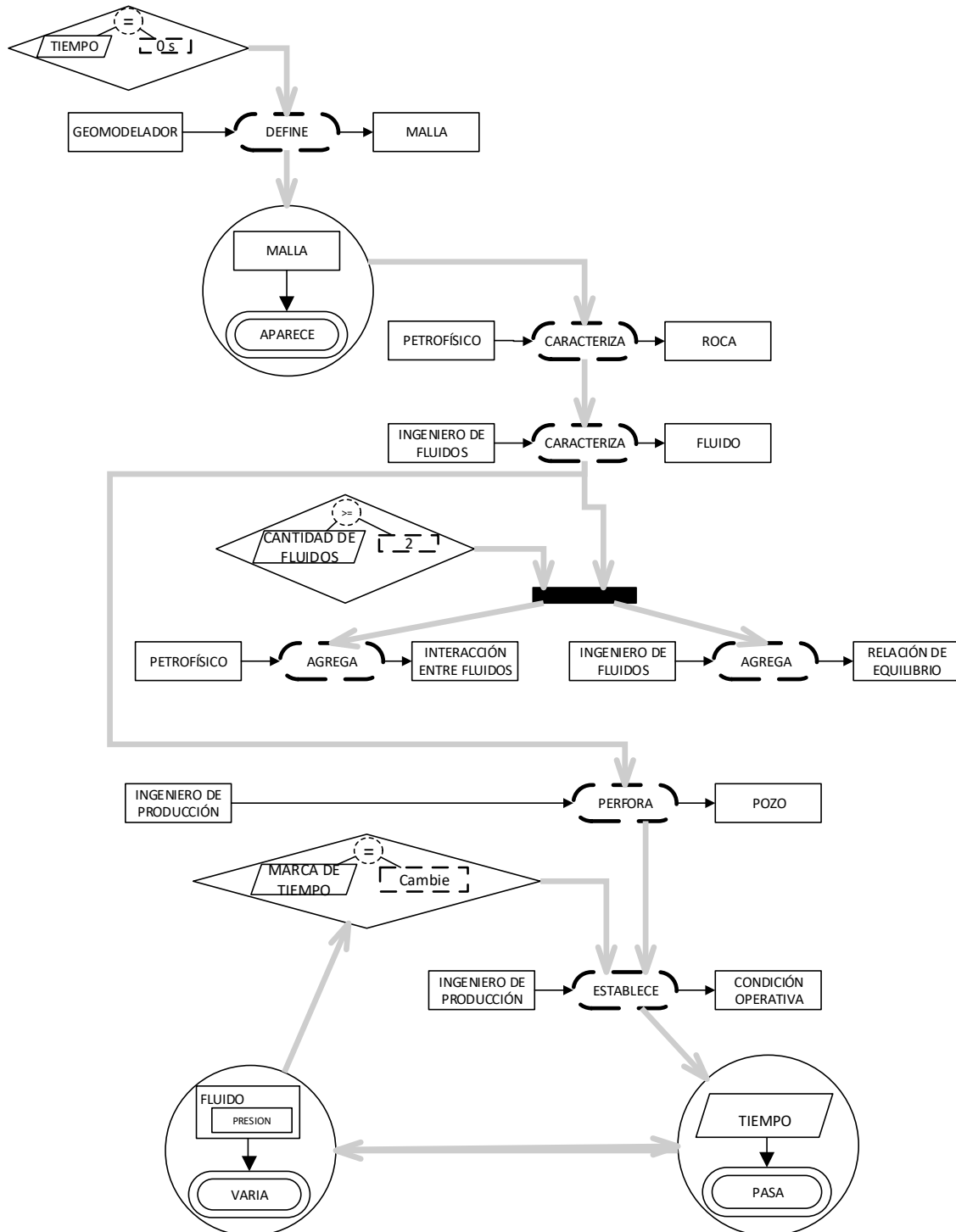


Figura 4-10.: Diagrama basado en el grafo de interacción de eventos. Los autores basados en Zapata et al. (2013).



Figura 4-11.: Representación de la aparición de la Malla. Los autores.

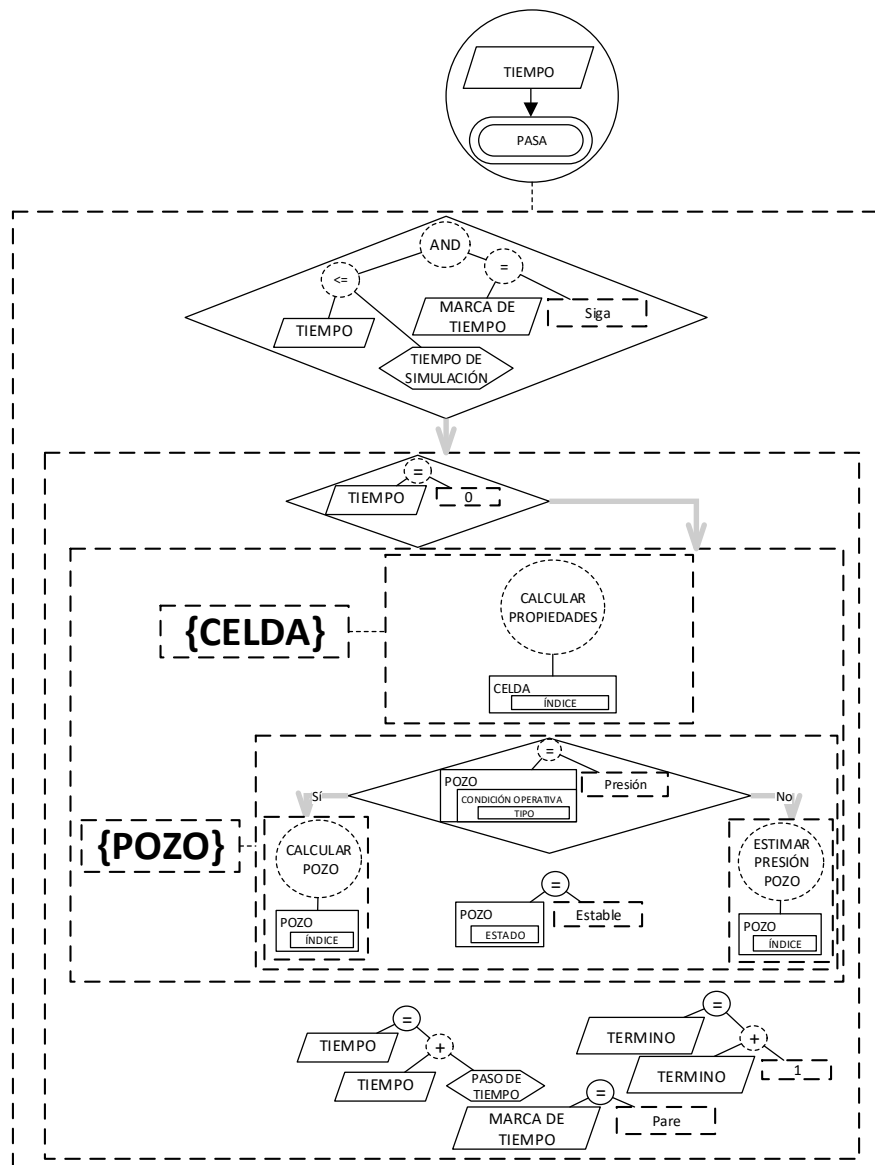


Figura 4-12.: Representación del paso del tiempo. Los autores.

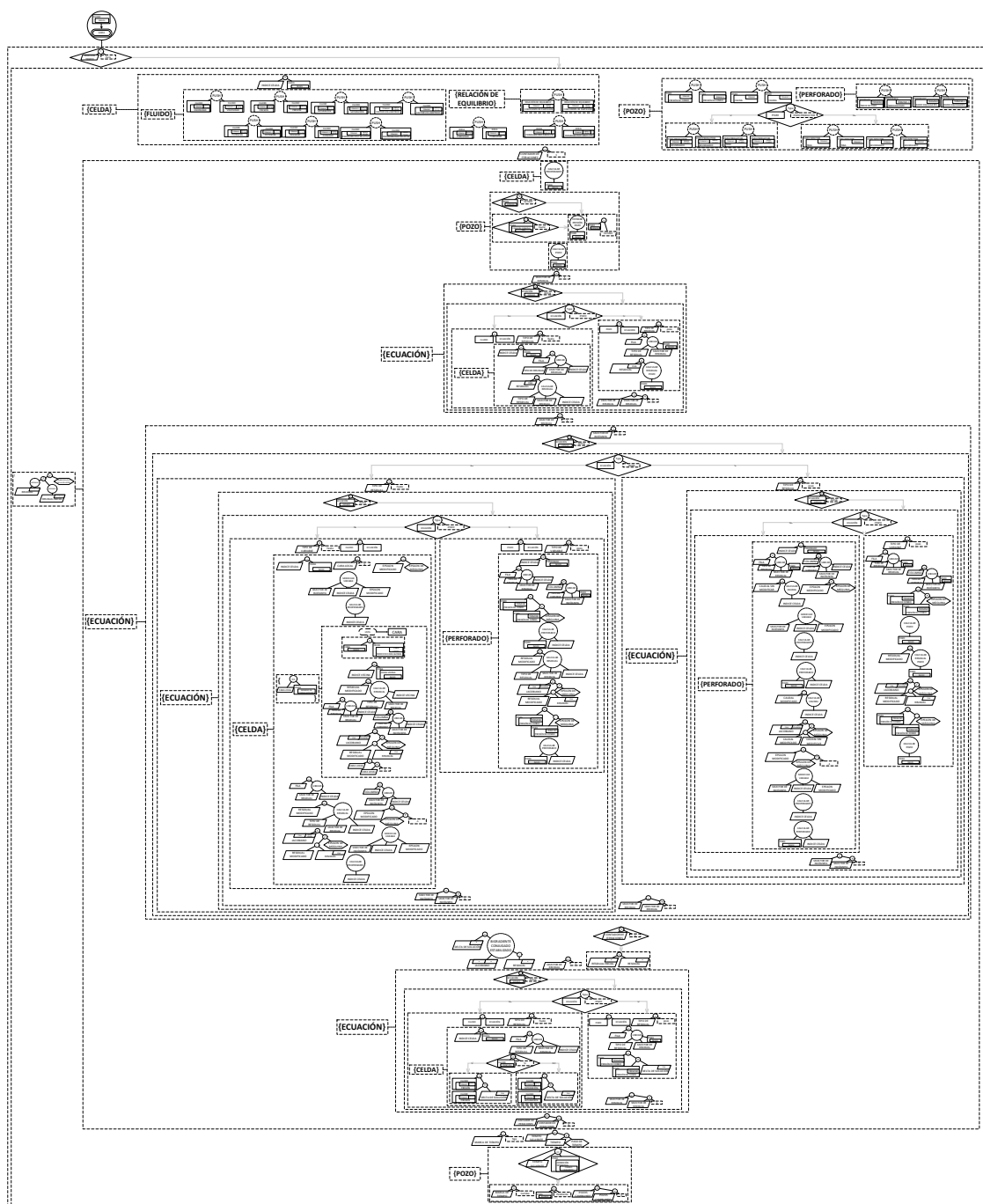


Figura 4-13.: Especificación del evento Presión del fluido varía. Los autores.

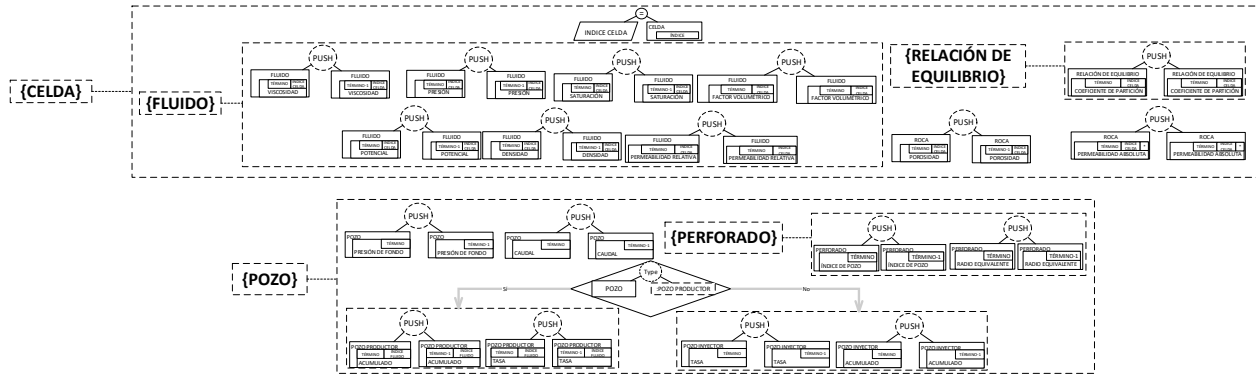


Figura 4-14.: Actualización de propiedades al término actual. Los autores.

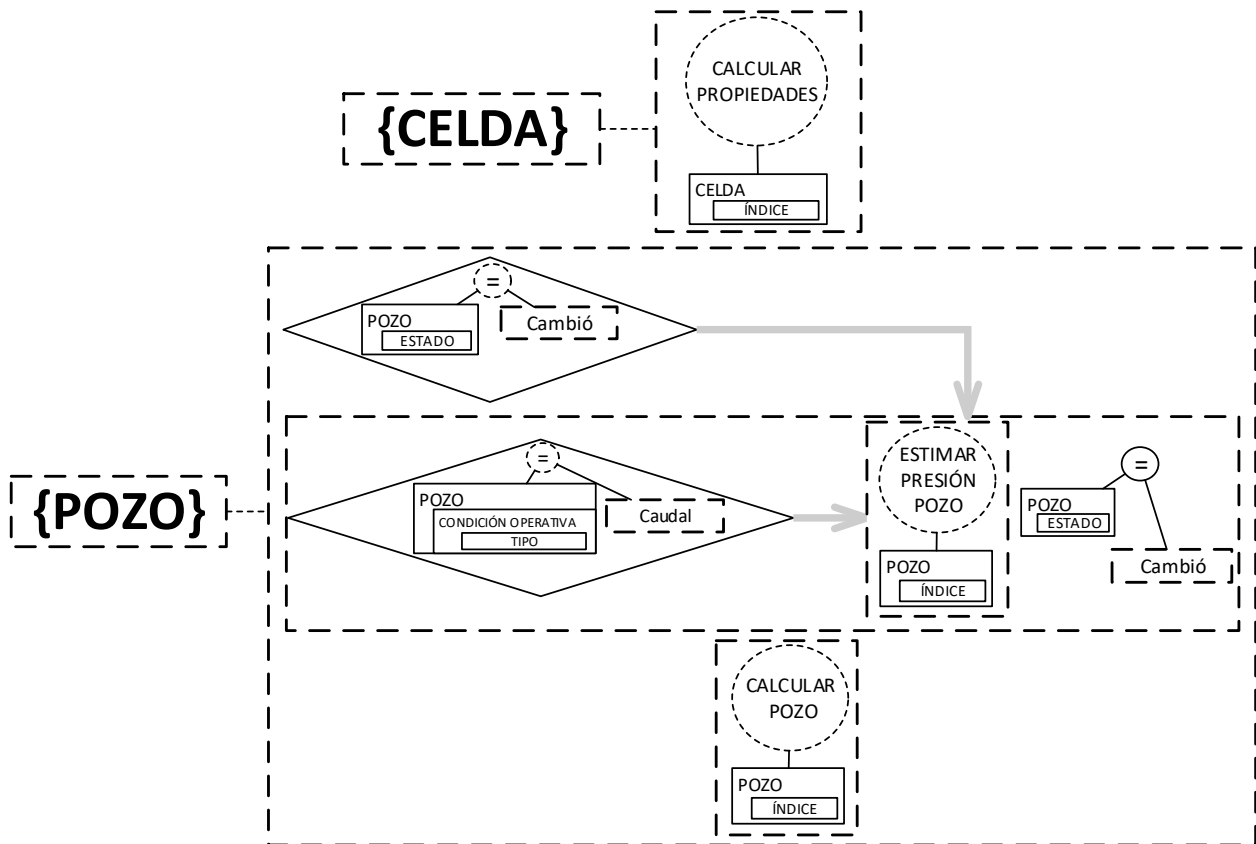


Figura 4-15.: Recálculo de Propiedades al término actual para la iteración. Los autores.

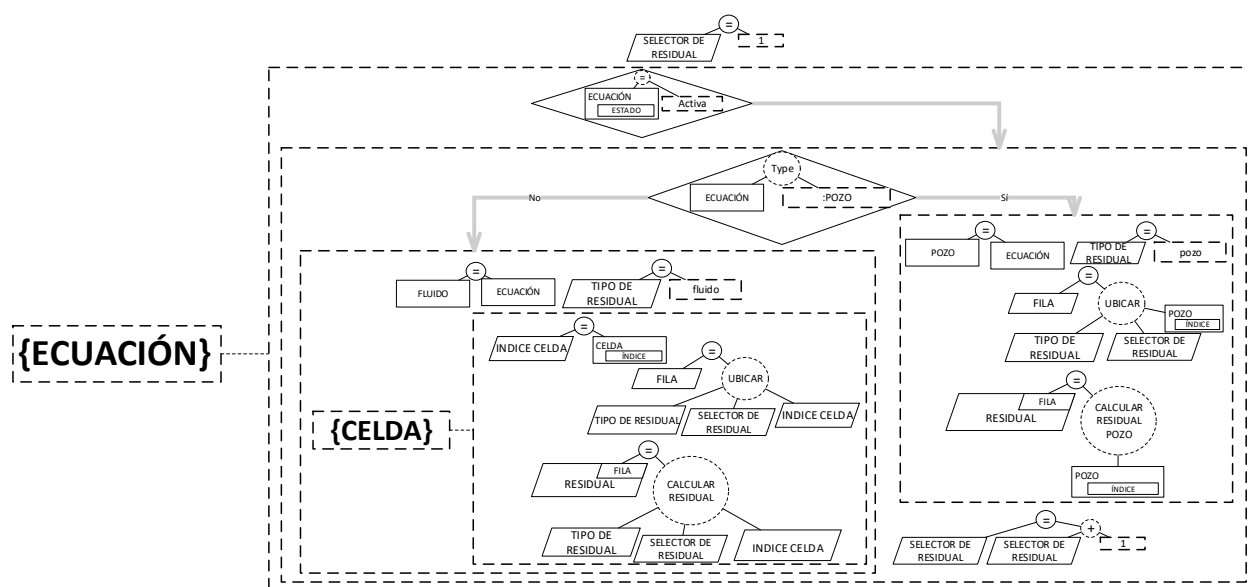


Figura 4-16.: Cálculo de residual para la iteración. Los autores.

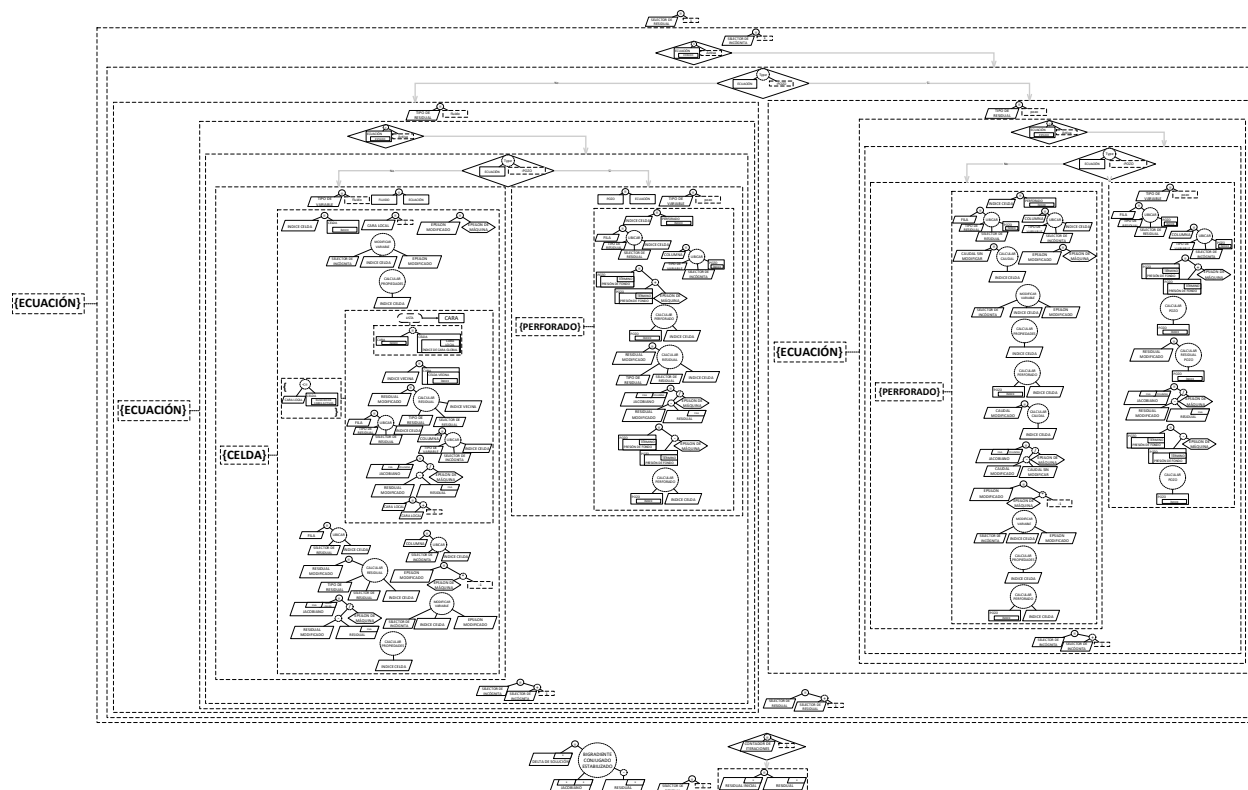


Figura 4-17.: Cálculo y armado de la matriz del jacobiano al término actual para la iteración. Los autores.

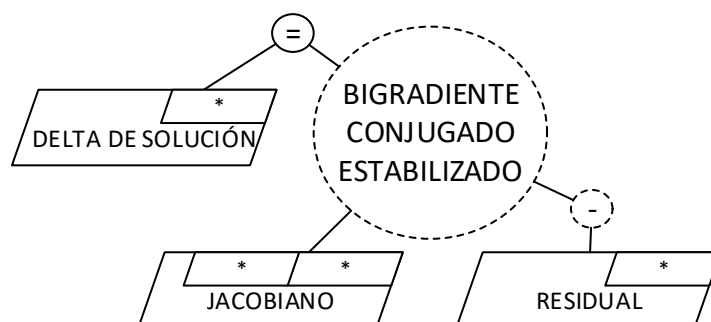


Figura 4-18.: Sistema lineal resultante del método de Newton-Raphson. Los autores.

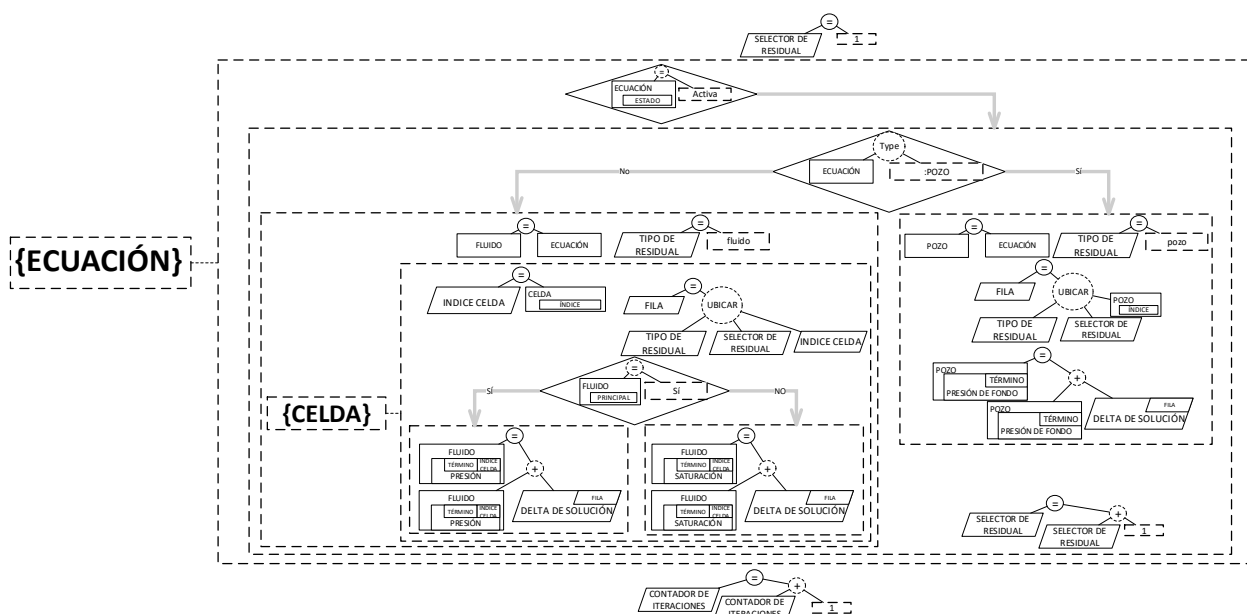


Figura 4-19.: Recálculo de Propiedades al término actual para la iteración. Los autores.

5. Validation

Se deben incluir tantos capítulos como se requieran; sin embargo, se recomienda que la tesis o trabajo de investigación tenga un mínimo 3 capítulos y máximo de 6 capítulos (incluyendo las conclusiones).

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Las conclusiones constituyen un capítulo independiente y presentan, en forma lógica, los resultados de la tesis o trabajo de investigación. Las conclusiones deben ser la respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Se deben titular con la palabra conclusiones en el mismo formato de los títulos de los capítulos anteriores (Títulos primer nivel), precedida por el numeral correspondiente (según la presente plantilla).

6.2. Recomendaciones

Se presentan como una serie de aspectos que se podrían realizar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada. Deben contemplar las perspectivas de la investigación, las cuales son sugerencias, proyecciones o alternativas que se presentan para modificar, cambiar o incidir sobre una situación específica o una problemática encontrada. Pueden presentarse como un texto con características argumentativas, resultado de una reflexión acerca de la tesis o trabajo de investigación.

A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido

Los Anexos son documentos o elementos que complementan el cuerpo de la tesis o trabajo de investigación y que se relacionan, directa o indirectamente, con la investigación, tales como acetatos, cd, normas, etc.

B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido

A final del documento es opcional incluir índices o glosarios. Éstos son listas detalladas y especializadas de los términos, nombres, autores, temas, etc., que aparecen en el mismo. Sirven para facilitar su localización en el texto. Los índices pueden ser alfabéticos, cronológicos, numéricos, analíticos, entre otros. Luego de cada palabra, término, etc., se pone coma y el número de la página donde aparece esta información.

C. Anexo: Nombrar el anexo C de acuerdo con su contenido

MANEJO DE LA BIBLIOGRAFÍA: la bibliografía es la relación de las fuentes documentales consultadas por el investigador para sustentar sus trabajos. Su inclusión es obligatoria en todo trabajo de investigación. Cada referencia bibliográfica se inicia contra el margen izquierdo.

La NTC 5613 establece los requisitos para la presentación de referencias bibliográficas citas y notas de pie de página. Sin embargo, se tiene la libertad de usar cualquier norma bibliográfica de acuerdo con lo acostumbrado por cada disciplina del conocimiento. En esta medida es necesario que la norma seleccionada se aplique con rigurosidad.

Es necesario tener en cuenta que la norma ISO 690:1987 (en España, UNE 50-104-94) es el marco internacional que da las pautas mínimas para las citas bibliográficas de documentos impresos y publicados. A continuación se lista algunas instituciones que brindan parámetros para el manejo de las referencias bibliográficas:

| Institución | Disciplina de aplicación |
|--|---|
| Modern Language Association (MLA) | Literatura, artes y humanidades |
| American Psychological Association (APA) | Ambito de la salud (psicología, medicina) y en general en todas las ciencias sociales |
| Universidad de Chicago/Turabian | Periodismo, historia y humanidades. |
| AMA (Asociación Médica de los Estados Unidos) | Ambito de la salud (psicología, medicina) |
| Vancouver | Todas las disciplinas |
| Council of Science Editors (CSE) | En la actualidad abarca diversas ciencias |
| National Library of Medicine (NLM) (Biblioteca Nacional de Medicina) | En el ámbito médico y, por extensión, en ciencias. |
| Harvard System of Referencing Guide | Todas las disciplinas |
| JabRef y KBibTeX | Todas las disciplinas |

Para incluir las referencias dentro del texto y realizar lista de la bibliografía en la respectiva sección, puede utilizar las herramientas que Latex suministra o, revisar el

instructivo desarrollado por el Sistema de Bibliotecas de la Universidad Nacional de Colombia¹, disponible en la sección "Servicios", opción "Trámites enlace .^{Entrega de tesis}".

¹Ver: www.sinab.unal.edu.co

Bibliografía

- Abou-Kassem, J. H., Farouq-Ali, S., Rafiqul Islam, M., et al. (2006). *Petroleum reservoir simulation: a Basic Approach*. Gulf Publishing Company.
- Bear, J. (2018). *Modeling Phenomena of Flow and Transport in Porous Media*, volume 31 of *Theory and Applications of Transport in Porous Media*. Cham: Springer International Publishing.
- Blatt, M., Burchardt, A., Dedner, A., Engwer, C., Fahlke, J., Flemisch, B., Gersbacher, C., Gräser, C., Gruber, F., Grüninger, C., Kempf, D., Klöfkorn, R., Malkmus, T., Müthing, S., Nolte, M., Piatkowski, M., & Sander, O. (2016). The Distributed and Unified Numerics Environment, Version 2.4. *Archive of Numerical Software*, 4(100), 13–29.
- Calle, J. (2016). Identificación de patrones de diseño para software científico a partir de esquemas preconceptuales. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Línea de Investigación: Ingeniería de software.
- Cao, H. (2002). *Development of Techniques for General Purpose Research Simulator*. PhD thesis.
- Chaverra, J. (2011). Generación automática de prototipos funcionales a partir de esquemas preconceptuales. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Chen, Z. (2007). *Reservoir simulation: mathematical techniques in oil recovery*, volume 77. Siam.
- DeBaun, D., Byer, T., Childs, P., & Chen, J. (2005). An extensible architecture for next generation scalable parallel reservoir simulation. ... *Reservoir Simulation*
- Ertekin, T., Abou-Kassem, J. H., & King, G. R. (2001). *Basic applied reservoir simulation*. Number Sirsi) i9781555630898.
- Fang, W., Jiang, H., Li, J., Wang, Q., Killough, J., Li, L., Peng, Y., & Yang, H. (2017). A numerical simulation model for multi-scale flow in tight oil reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 44(3), 446–453.

- Flemisch, B., Darcis, M., Erbertseder, K., Faigle, B., Lauser, A., Mosthaf, K., Müthing, S., Nuske, P., Tatomir, A., Wolff, M., & 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.
- Hu, X., Xu, J., & Zhang, C. (2013). Application of auxiliary space preconditioning in field-scale reservoir simulation. *Science China Mathematics*, 56(12), 2737–2751.
- Isaza, C. (2017). Modelo fenomenológico y simulación de la disolución de los asfaltenos depositados en formación usando un solvente químico. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Magister en Ingeniería de Petróleos.
- Kelly, D. (2015). Scientific software development viewed as knowledge acquisition. *J. Syst. Softw.*, 109(C), 50–61.
- Mohammad, R. S., Zhao, X., Zhang, S., & Shah, S. J.-u.-D. (2017). Bubble point simulation of reservoir oil and carbon dioxide mixtures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(4), 1633–1641.
- Mozo, I. (2017). Desarrollo de un modelo matemático de la estimulación de pozos productores de crudo pesado con nanofluidos reductores de viscosidad. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Noreña, P. & Zapata, C. (2018a). A pre-conceptual-schema-based representation of time events coming from scientific software domain. In *Proceedings of The 22nd World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2018)* (pp. 53–58).
- Noreña, P. & Zapata, C. (2018b). Una representación basada en esquemas preconceptuales de eventos determinísticos y aleatorios tipo señal desde dominios de software científico. *Research in Computing Science*, 147, 207–220.
- Noreña, P. & Zapata, C. (2019). Business simulation by using events from pre-conceptual schemas. In *Developments in business simulation and experiential learning: proceedings of the annual Absel conference* (pp. 258–263).
- Noreña, P., Zapata, C., & Villamizar, A. (2018). Representación de eventos a partir de estructuras lingüísticas basadas en roles semánticos: Una extensión al esquema preconceptual. *Investigación e innovación en Ingeniería de Software*, 2, 69–79.
- 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.

- Solano, H., Valencia, J., Mejía, J., & Ocampo, A. (2019). A modeling study for foam generation for eor applications in naturally fractured reservoirs using disperse surfactant in the gas stream. In *IOR 2019–20th European Symposium on Improved Oil Recovery*.
- Valencia, J. (2016). Modelamiento del flujo y generación de espumas en medios porosos usando surfactante disperso en gas. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Línea de Investigación: Recobro Mejorado.
- Valencia, J., Ocampo, A., & Mejía, J. (2018). Development and validation of a new model for in situ foam generation using foamer droplets injection. *Transport in Porous Media*, (pp. 1–18).
- Wang, K., Liu, H., & Chen, Z. (2015). A scalable parallel black oil simulator on distributed memory parallel computers. *Journal of Computational Physics*, 301, 19 – 34.
- 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.
- 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.
- Wang, K., Liu, H., Luo, J., Yu, S., Chen, Z., & Zhang, P. (2016). Parallel simulation of full-field polymer flooding. In *2016 IEEE 2nd International Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing (HPSC), and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS)* (pp. 220–225).
- Zapata, C. (2007). *Definición de un esquema preconceptual para la obtención automática de esquemas conceptuales de UML*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín.
- Zapata, C. (2012). *The UNC-Method revisited: elements of the new approach*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing.
- Zapata, C., Noreña, P., & González, N. (2013). Representación de eventos disparadores y de resultado en el grafo de interacción de eventos. *Ingenierías USBMed*, 4(2), 23–32.
- Zaydullin, R., Voskov, D. V., James, S. C., Henley, H., & Lucia, A. (2014). Fully compositional and thermal reservoir simulation. *Computers and Chemical Engineering*, 63, 51 – 65.
- 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.

- Zhang, J., Delshad, M., & Sepehrnoori, K. (2007). Development of a framework for optimization of reservoir simulation studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 59(1), 135 – 146.